

Федеральное агентство научных организаций  
Российская академия наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт озероведения Российской академии наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



**Всероссийская  
конференция  
по крупным  
внутренним  
водоёмам**

V Ладожский  
симпозиум

Санкт-Петербург,  
9-11 ноября 2016 г

**Сборник научных трудов конференции**

Санкт-Петербург  
2016

УДК 502.3+504+556+574.5  
ББК (Д)26,222

Ответственные редакторы:

Академик РАН Румянцев Владислав Александрович, д.г.н. Поздняков Шамиль Рауфович

Редакционная коллегия:

д.б.н. Курашов Е.А., д.г.н. Науменко М.А., д.т.н. Нестеров Н.А., к.г.н. Игнатьева Н.В., д.г.н. Анохин В.М., к.ф.-м.н. Рыбакин В.Н., к.г.н. Сапелко Т.В. к.г.н. Иванова Е.В, Маркова Е.Г., Зеленкова Н.Г.

Всероссийская конференция по крупным внутренним водоёмам (V Ладужский симпозиум). Сборник научных трудов конференции. СПб.: Издательство «Лема», 2016. – 467 с.; ил.

Сборник содержит статьи, подготовленные на основе докладов, представленных и обсужденных на Всероссийской конференции по крупным внутренним водоемам. Тематика публикации связана с исследованиями крупных внутренних водоемов, современным мониторингом их экосистем, различными аспектами гидрологического и гидрохимического режима, функционирования биологических комплексов, моделированием и оценкой геологических и палеолимнологических особенностей. Сборник представляет интерес для специалистов в области лимнологии, гидрологии и смежных наук.

The proceedings contain articles based on presentations, submitted and discussed on the all-Russian scientific conference on large inland water bodies. The subjects of publications connected with research of large inland water bodies, advanced monitoring of their ecosystems, research of the various aspects of hydrological and hydrochemical regime, functioning of biological complexes, modeling and assessment of geological and paleolimnological aspects. The proceedings can be interesting for experts in the field of limnology, hydrology and allied sciences.

*Конференция проведена при финансовой поддержке  
Федерального агентства научных организаций и Отделения наук о Земле РАН*

© Институт озераведения РАН, 2016

ISBN

## Предисловие

Всероссийская научно-практическая конференция по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум) проводилась 9 – 11 ноября 2016 г. в Санкт-Петербурге по инициативе Института озераведения РАН и Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Проведение данной конференции возвращает традицию организации подобных симпозиумов, посвященных проблемам крупных озер. Первый такой симпозиум был организован в ноябре 1993 г. в Санкт-Петербурге с целью рассмотрения экологических проблем Ладожского озера, второй - в августе 1996 г. в г. Йенсу (Финляндия) освещал состояние больших озер Европы, 3-ий – в августе 1999 г. в г. Петрозаводске посвящался проблемам мониторинга и управления Ладожским озером и другими большими озерами, 4-тый - в сентябре 2002 г. в г. Великом Новгороде, где основное внимание было уделено охране и рациональному использованию водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер.

В современных условиях экосистемы крупных водоемов играют все большее значение для обеспечения устойчивого развития не только крупных регионов, но и целых стран. Наличие крупного водоема обеспечивает решение целого ряда первостепенных жизненно-важных задач. Вместе с тем антропогенное воздействие на водные системы, недостаточное научное обеспечение проведения мероприятий на акваториях водных объектов, долговременное накопление загрязнений может создавать серьезные проблемы экологической безопасности населения. В этой связи важность и актуальность проведения данной конференции является очевидной.

Сборник материалов конференции, подготовленный по ее результатам, включает около 80 статей, посвященных современному состоянию крупных водоемов Российской Федерации – Ладожскому, Онежскому, Байкалу, Селигеру и другим, а также в некоторых других странах (США, Финляндии, Монголии). Представленные работы показали многогранность и сложность затрагиваемых проблем. Состоявшаяся научная дискуссия обеспечила обмен мнениями по широкому кругу вопросов, связанных с современным мониторингом экосистем крупных водных объектов, исследованиями в их бассейнах, гидрологическими закономерностями в условиях изменяющегося климата, различными аспектами гидрохимического режима и функционирования биологических комплексов, моделированием и оценкой геологических и палеолимнологических особенностей крупных водоемов.

Важнейшим результатом проведенного симпозиума является решение о необходимости создания подпрограммы мер по сохранению водной системы Ладога-Онега-Ильмень в рамках соответствующей ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах», учитывая важность и актуальность рассматриваемых вопросов. Кроме того, очевидна необходимость продолжения практики регулярного проведения конференций, посвященных крупным водоемам Евразии.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i> .....	3
<i>Доклады пленарного заседания</i> .....	10
<b>Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А.</b> ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	10
<b>Комарицын А.А., Нестеров Н.А.</b> НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ – ВАЖНЫЙ КОМПОНЕНТ ПОВЫШЕНИЯ РОЛИ И ЗНАЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ .....	18
<b>Курашов Е.А., Капустина Л.Л., Барбашова М.А., Дудакова Д.С., Митрукова Г.Г., Протопопова Е.В., Родионова Н.В., Иофина И.В.</b> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КОНЦЕ XX - НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ .....	22
<b>Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Чичкова Е.Ф.</b> ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОСБОРА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	29
<b>Румянцев В.А., Крюков Л.Н.</b> ОБОСТРЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВОДОСБОРЕ И АКВАТОРИИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	32
<b>Секционные доклады</b> .....	37
<b>Амантов А.В.</b> ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	37
<b>Анненкова Н.В.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HTS ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОБИОНТОВ .....	44
<b>Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А.</b> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ РЕЛЬЕФА ДНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	48
<b>Астраханцева О.Ю.</b> ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	54
<b>Астраханцева О.Ю., Палкин О.Ю.</b> СРЕДНЕМНОГОЛЕТНИЕ СОДЕРЖАНИЯ $P_{орг}$ , $N_{орг}$ , $S_{орг}$ В ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ ВОД, ВЗВЕСИ ВОД, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	57
<b>Астраханцева О.Ю., Белозерцева И.А., Палкин О.Ю.</b> ГЕОХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ РЕЗЕРВУАРОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ К ТЕХНОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ .....	64
<b>Астраханцева О.Ю., Белозерцева И.А., Палкин О.Ю.</b> СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕГАСИСТЕМЫ “ОЗЕРО БАЙКАЛ – ПОТОКИ ПРИРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	70
<b>Барбашова М.А.</b> ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА ОТКРЫТЫХ РАЙОНОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	74
<b>Белкина Н.А.</b> НАКОПЛЕНИЕ ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ВНУТРЕННЯЯ ФОСФОРНАЯ НАГРУЗКА .....	81
<b>Болдина О.Н., Чунаев А.С.</b> STERNANOSPHERA PLUVIALIS – РЕДКИЙ ВИД ВОДОРΟΣЛЕЙ, ОБИТАЮЩИЙ НА ЛАДОЖСКОЙ ДАМБЕ .....	87
<b>Бородулина Г.С., Токарев И.В., Крайнюкова И.А.</b> ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	90



<b>Верзилин Н.Н.</b> О КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ В РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ГОЛОЦЕНЕ .....	96
<b>Волчек А.А., Кирвель И.И., Хоиньски А., Парфомук С.И.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СРЕДНИХ ГОДОВЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ОЗЕРА НАРОЧЬ .....	101
<b>Догановский А.М., Давыденко Е.В.</b> УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ КРУПНЫХ ОЗЁР ЕВРОПЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА .....	108
<b>Домышева В.М, Пестунов Д.А., Иванов В.Г., Сакирко М.В., Шамрин А.М., Панченко М.В.</b> ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОВ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ В СИСТЕМЕ «АТМОСФЕРА-ВОДА» ПО АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД 2013 И 2016 Г.Г. ....	115
<b>Драбкова В.Г., Измайлова А.В., Нестеров Н.А.</b> ОЗЕРО СЕЛИГЕР КАК КРУПНЕЙШИЙ ВОДОЕМ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ .....	121
<b>Дудакова Д.С., Родионова Н.В.</b> ОСЕННИЙ ЗООПЛАНКТОН И БЕНТОС ЛИТОРАЛИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА САЙМА (ФИНЛЯНДИЯ) .....	128
<b>Егорова Н.В.</b> ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАНЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ .....	133
<b>Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Здоровеннов Р.Э., Митрохов А.В., Здоровеннова Г.Э., Гавриленко Г.Г., Волков С.Ю., Богданов С.Р., Тержеевик А.Ю.</b> ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	137
<b>Зверев И.С., Ушаков В.К., Шипунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМОДИНАМИКИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	141
<b>Здоровеннов Р.Э., Митрохов А.В., Пальшин Н.И., Здоровеннова Г.Э., Ефремова Т.В., Тержеевик А.Ю.</b> ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В ПРИРОДНЫХ ОБЛАСТЯХ ВОДОЕМОВ .....	149
<b>Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов Р.Э., Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Богданов С.Р., Тержеевик А.Ю.</b> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ .....	153
<b>Зилов Е.А., Кращук С.Л., Онучин К.А., Пислегина Е.В., Русановская О.О., Шимараева С.В.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ 70-ЛЕТНИХ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	157
<b>Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В.</b> ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЕГО КОМПОНЕНТЫ В БОЛЬШИХ И МАЛЫХ ОЗЕРАХ КАРЕЛИИ .....	161
<b>Измайлова А.В.</b> ИЗМЕНЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ВОДНЫХ МАСС, СОДЕРЖАЩИХСЯ В КРУПНЕЙШИХ ОЗЕРАХ МИРА, С СЕРЕДИНЫ ПРОШЛОГО ВЕКА ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ .....	168
<b>Иофина И.В.</b> ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ГРИБОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В СВЯЗИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ .....	175

<b>Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т.</b> ВОДНЫЕ СООБЩЕСТВА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ .....	180
<b>Кондратьев С.А., Брюханов Ю.А., Викторова Н.В., Шмакова М.В., Обломкова Н.С., Маркова Е.Г.</b> БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО С ЧАСТНОГО ВОДОСБОРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ .....	185
<b>Коросов А.А., Поздняков Д.В., Моисеев А.В.</b> ИДЕЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА PAN-SHARPENING ДЛЯ ОЗЕРА ГУРОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ MSI (SENTINEL1) И MODIS .....	193
<b>Коросов А.А., Поздняков Д.В., Шухман Р., Моисеев А.В.</b> БИООПТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИ МЕЛКИХ ВОД ОЗЕРА МИЧИГАН .....	197
<b>Костромина Н.А., Рыбалко А.Е., Локтев А.С.</b> НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	202
<b>Кочков Н.В., Протопопова Е.В.</b> БАЗА ДАННЫХ «PHYTOLADOGA» .....	207
<b>Крылова Ю.В., Курашов Е.А., Митрукова Г.Г., Суценко А.С., Ходонович В.В., Явид Е.Я.</b> МЕТАБОЛИТНЫЙ СОСТАВ <i>POTAMOGETON PERFOLIATUS</i> L. И <i>PERSICARIA AMPHIBIA</i> (L.) GRAY ИЗ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ В ЛАДОЖСКОМ И ОНЕЖСКОМ ОЗЕРАХ.....	212
<b>Кулакова Н.В., Ханаев И.В., Сакирко М.В., Адельшин Р.В., Феранчук С.И., Майкова О.О., Бутина Т.В., Беликов С.И.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ГУБОК В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	220
<b>Лобанова А.С.</b> РОЛЬ ВСЕЛЕНЦА <i>GMELINOIDES FASCIATUS</i> (STEBBING) В ПИТАНИИ РЫБ НА ЛИТОРАЛИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	225
<b>Лозовик П.А., Сабылина А.В.</b> ВНЕШНЯЯ НАГРУЗКА НА ЛАДОЖСКОЕ И ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРА И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ К АНТРОПОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ .....	229
<b>Лубяга Ю.А., Трифонова М.С., Емишанова В.А., Гурков А.Н., Аксёнов-Грибанов Д.В., Тимофеев М.А.</b> СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ФЕРМЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ НА ТЕПЛОВОЙ ШОК У АМФИПОД <i>GMELINOIDES FASCIATUS</i> ИЗ ЛИТОРАЛИ ОЗ. БАЙКАЛ И ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА .....	236
<b>Лудикова А.В.</b> ДИАТОМОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ШХЕРНОГО РАЙОНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	240
<b>Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Сапелко Т.В.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА «ИЗОЛЯЦИОННЫХ БАССЕЙНОВ» ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	247
<b>Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Ткаченко Л.Л.</b> ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ И ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ПЕСТИЦИДОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ СЕВЕРНОГО ПРИХУБСУГУЛЬЯ В 2008-2015 .....	254
<b>Минакова Е.А., Шлычков А.П.</b> ЭКОДИАГНОСТИКА НАГРУЗКИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН .....	259

<b>Митрукова Г.Г., Капустина Л.Л., Курашов Е.А.</b> МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В ЩУЧЬЕМ ЗАЛИВЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	264
<b>Мухин И.А., Дудакова Д.С., Дудаков М.О.</b> НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ МИКРОПЕРИФИОНА В СКАЛЬНОЙ ЛИТОРАЛИ (НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА) .....	272
<b>Назарова Л.Е.</b> КЛИМАТ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА: ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЯ .....	276
<b>Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Крючков А.М.</b> ИТОГИ ТЕРМИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА .....	279
<b>Нестеров Н.А., Гузиватый В.В., Науменко М.А.</b> ГИДРОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДОННЫХ ОБЪЕКТОВ .....	287
<b>Пальшин Н.И., Здоровеннов Р.Э., Митрохов А.В., Здоровеннова Г.Э., Ефремова Т.В., Гавриленко Г. Г., Волков С.Ю., Богданов С.Р., Тержевик А.Ю.</b> РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД ВЕСЕННЕЙ ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ .....	294
<b>Петрова Т.Н., Гусева М.А.</b> ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ПРИТОКОВ .....	299
<b>Поздняков Ш.Р., Румянцев В.А., Иванова Е.В.</b> ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ СУБМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ БАСЕЙНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	307
<b>Полетаева В.И., Пастухов М.В.</b> РТУТЬ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА .....	314
<b>Постникова П.В., Макарская Г.В., Анонасенко А.Д., Пономарева Ю.А.</b> МНОГОЛЕТНИЕ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА .....	318
<b>Потемкина Т.Г.</b> ОЗЕРНО-РЕЧНАЯ СИСТЕМА БАЙКАЛ-СЕЛЕНГА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ .....	324
<b>Протопопова Е.В.</b> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	328
<b>Русанов А.Г.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ПЕРИФИТОНА В МОНИТОРИНГЕ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	334
<b>Рыбакин В.Н.</b> ДНО ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА. ИЗВЕСТНЫЕ ФАКТЫ И НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	340
<b>Савельева Л.А., Андреев А.А., Шумиловских Л., Громиз Р., Лудикова А.В., Субетто Д.А., Федоров Г.Б., Крастель С., Вагнер Б., Меллес М.</b> НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВОЙ И ГОЛОЦЕНОВОЙ ИСТОРИИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ....	345
<b>Сакирко М.В., Домышева В.М., Ходжер Т.В.</b> СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ВОДЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	351
<b>Сапелко Т.В.</b> ПРОБЛЕМЫ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ .....	356

<b>Семенов В.А.</b> КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СТОКА РЕК В БАССЕЙНАХ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЁМОВ РОССИИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ .....	362
<b>Семенова И.В., Булгаков В.Г., Запевалов М.А., Каткова М.Н., Агеева Н.В.</b> СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ: НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....	367
<b>Сидорова А.И.</b> МАКРОЗООБЕНТОС ПРОФУНДАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	372
<b>Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Владов М.Л., Субетто Д.А., Марченко А.Л.</b> ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ПРЕСНОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ .....	378
<b>Субетто Д.А., Потахин М.С., Зобков М.Б., Алексей Юрьевич Тарасов А.Ю., Белкина Н.А., Шелехова Т.С.</b> РАЗВИТИЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ ЦИФРОВЫЕ КАРТЫ..	383
<b>Сярки М.Т.</b> РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА .....	390
<b>Талисманов С.С.</b> СОВРЕМЕННЫЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ THERMO SCIENTIFIC И CRDS- АНАЛИЗАТОРЫ PICARRO ДЛЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	395
<b>Тарасова Е.Н., Мамонтова Е.А., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Ткаченко Л.Л.</b> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОД ОЗЕРА ХУБСУГУЛ (МОНГОЛИЯ) В 1959-2011 ...	399
<b>Терехов А.В., Сапелко Т.В.</b> К ПРОБЛЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА В ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	406
<b>Токарев В.И., Рыбакин В.Н., Румянцев В.А., Воронюк Г.Ю.</b> ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА И РАЗГРУЗКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО .....	415
<b>Трапезников Ю.А.</b> КРУПНЫЕ ОЗЕРА КАК ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА .....	423
<b>Трифорова И.С., Павлова О.А., Афанасьева А.Л.</b> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОЙ РАФИДОФИТОВОЙ ВОДОРОСЛИ В ПРИТОКАХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	426
<b>Уличев В.И., Дудакова Д.С.</b> МОНИТОРИНГ ЧИСЛЕННОСТИ ЛАДОЖСКОЙ КОЛЬЧАТОЙ НЕРПЫ ( <i>PUSA HISPIDA</i> <i>LADOGENSIS</i> ) В ШХЕРНОМ РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА .....	431
<b>Филатов Н.Н., Выручалкина Т.Ю.</b> О ВНУТРИВЕКОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ ВОДЫ ВЕЛИКИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ...	437
<b>Фомина Ю.Ю.</b> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА ПЕЛАГИАЛИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА.....	443
<b>Шапоренко С.И., Кузовлев В.В.</b> МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕРА СЕЛИГЕР В РАЙОНЕ Г. ОСТАШКОВА .....	449

<b>Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Кондратьев С.А.</b> ДЕТЕРМИНИРОВАНО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОЕМА РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ .....	455
<b>Щапова Е.П., Гурков А.Н., Белоусова И.А., Борвинская Е.В., Бадуев Б.К., Меглинский И.В., Тимофеев М.А.</b> МЕТОД МИКРОИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА ОЗЕРА БАЙКАЛ .....	462

---

## ДОКЛАДЫ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ

---

УДК 56.392

### ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Шамиль Рауфович Поздняков  
д.г.н., директор ИНОЗ РАН  
e-mail: [lake@limno.org.ru](mailto:lake@limno.org.ru), [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)

Сергей Алексеевич Кондратьев,  
д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе ИНОЗ РАН  
e-mail: [kondratyev@limno.org.ru](mailto:kondratyev@limno.org.ru)

*Аннотация:* Сформулированы предложения по совершенствованию мониторинга Ладожского озера в современных условиях, которые касаются развития системы наблюдений на водоеме, оценки его состояния, а также прогноза возможных изменений под воздействием антропогенных и климатических воздействий.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, мониторинг, система измерений, оценка состояния, прогнозирование и моделирование

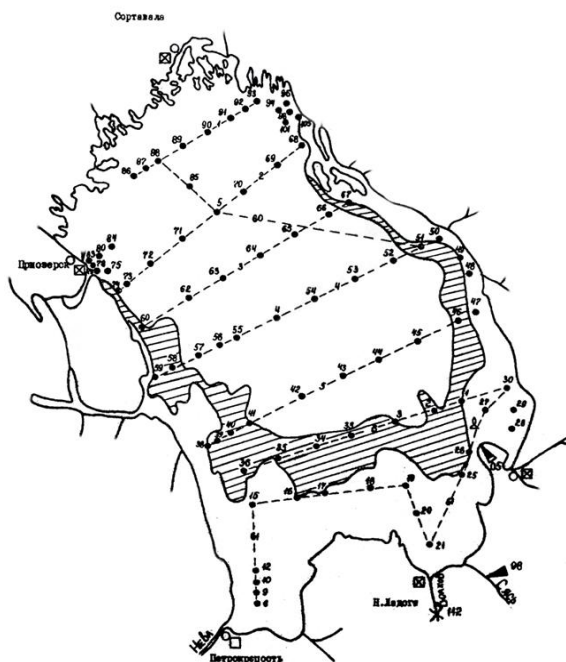
В соответствии с Положением об осуществлении государственного мониторинга водных объектов (утв. постановлением Правительства РФ от 10 апреля 2007 г. N 219) «Мониторинг представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния водных объектов, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц... Организация и осуществление мониторинга проводятся Федеральным агентством водных ресурсов, Федеральным агентством по недропользованию, Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Федеральной службой по надзору в сфере природопользования с участием уполномоченных органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации». В компетенцию институтов РАН и других научных учреждений входит формулировка предложений по возможному совершенствованию системы мониторинга на основе результатов проведенных ими исследований.

Цель настоящей работы – формулировка предложений по совершенствованию системы мониторинга Ладожского озера в современных условиях, которые должны касаться, как это следует из определения мониторинга водных объектов, развитию системы наблюдений на водоеме, оценки его состояния, а также прогнозирования возможных изменений под воздействием антропогенных и климатических воздействий.

#### **Совершенствование системы наблюдений**

Основными организациями, осуществляющими многолетние наблюдения за гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками Ладожского озера, являются Северо-западное УГМС и ИНОЗ РАН. На начальном этапе своего существования системы наблюдений за характеристиками водных масс Ладожского озера, используемые в указанных организациях, имели близкую пространственную структуру (рис. 1 а,б). Они были разработаны на основе экспертных оценок специалистов, хорошо знающих объект исследования.

а)



б)



Рис. 1. Схема расположения станций в системах измерений Северо-западного УГМС (а) и ИНОЗ РАН (б) в 50-60-х годах прошлого века [13].

Они были разработаны на основе экспертных оценок специалистов, хорошо знающих объект исследования. Первый нормативный документ по организации и проведению системы наблюдений системы на водных объектах был разработан и опубликован в 1977 г. [5]. Последующие этапы развития системы нашли свое отражение в усовершенствованных документах [6]. РД 52.24.309 [10] декларирует следующие основные принципы организации системы наблюдений: а) комплексность и систематичность наблюдений; б) согласованность сроков их проведения с характерными фазами гидрологического режима водных объектов; в) определение состава и свойств воды едиными или сопоставимыми методиками. При этом комплексность наблюдений обеспечивается одновременностью проведения наблюдений по гидрохимическим, гидрологическим, гидробиологическим показателям и определением в донных отложениях таких загрязняющих веществ, как ХОП, нефтяные углеводороды, ПАУ и тяжелые металлы. Можно сказать, что нормативная база мониторинга водных объектов в России находится на достаточно высоком уровне, чего нельзя сказать о практической реализации рекомендаций многочисленных РД.

За последние десятилетия трансформация систем наблюдения Северо-западного УГМС и ИНОЗ РАН происходила в разных направлениях. Если Северо-западное УГМС оптимизировало систему наблюдений в установленных ранее точках мониторинга (рис. 1а) в основном по причине сокращения финансирования, то ИНОЗ РАН акцентировал внимание на выполнении различных научных проектов, связанных с организацией более детальных экспериментальных исследований в различных частях озера.

Анализ состояния современной системы наблюдений в рамках государственного мониторинга Ладожского озера выполнен в работе [12]. Проводилось сравнение требований РД 52.24.309 и результатов мониторинга Ладоги в 2009-2010 годах. Полученные результаты оказались неутешительными. Так, количество пунктов наблюдений за гидрохимическими характеристиками на акватории Ладожского озера сократилось со 104 в конце восьмидесятых годов прошлого века до 14 – 16. При этом измерения проводились 1 раз в год в разные сезоны, а полученные результаты принимались за среднегодовые значения, что не допустимо. К основным недостаткам

существующей системы наблюдений на Ладожском озере относятся, прежде всего, следующие факторы:

- Отсутствуют наблюдения за гидробиологическими и токсикологическими характеристиками, а также характеристиками донных отложений;
- Программа гидрохимического мониторинга представляет собой неполный вариант обязательной программы наблюдений, в которую не включен ряд важных характеристик, рекомендованных в РД (например, рН, цветность, CO<sub>2</sub>);
- Гидрологический мониторинг представлен только тремя береговыми станциями: Валаам, Петрокрепость и Сторожно. Измерения метеоэлементов на акватории не проводятся. Водный баланс не составляется.

В соответствии с существующими нормативными документами, эти работы должны выполнять подразделения Росгидромета.

В результате вырисовывается довольно мрачная картина. На водосборе Ладожского озера расположено большое количество промышленных и сельскохозяйственных предприятий, сбрасывающих стоки в притоки озера, присутствуют также прямые сбросы на акваторию. При этом контроль токсикологического и биологического загрязнения водной массы отсутствует, не выполняется и контроль загрязнения донных осадков, являющихся источником вторичного загрязнения. В тоже время Ладожское озеро – безальтернативный источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, характеризующегося чрезвычайно высокими темпами роста онкологических заболеваний среди населения. А система мониторинга Ладоги не контролирует риски, связанные с возможным ущербом для здоровья людей за счет неудовлетворительного качества воды, поступающей в водозаборы города.

В сложившейся ситуации необходимо кардинальным образом изменить и усовершенствовать систему мониторинга, используя при этом, как опыт многолетних предшествующих работ, так и научно-технические достижения последних лет. Кроме стремления к максимально полному выполнению требований существующих РД по составу измерений, их частоте и расположению пунктов измерений, упомянутые усовершенствования должны выполняться в следующих основных направлениях.

- Актуальным направлением развития мониторинга водных объектов является организация токсикологического и гидробиологического мониторинга в соответствии с требованиями РД 52.24.309
- Необходимо организовать мониторинг состояния донных отложений, дополнив его следующими пунктами: а) ввести в рассмотрение дополнительные поддиапазоны частиц нанометрического масштаба; б) разработать расширенную систему методов гранулометрического анализа проб донных отложений с учетом частиц нанометрических размеров, где гидравлические методы измерений должны быть состыкованы с современными методами, использующими лазерные анализаторы крупности [7].
- Перспективным является внедрение в систему наблюдений автономных буйковых станций, пригодных для использования в условиях Ладожского озера, в результате чего должна быть получена достаточно эффективная система контактных измерений параметров Ладожского озера.
- Использование дистанционных методов измерений дает возможность проведения мгновенной съемки всей акватории озера. Спутниковая составляющая мониторинга характеризуется оперативностью и регулярностью получения данных, а также относительно низкими затратами по сравнению с проведением натурных измерений.
- Необходимо правильно выбирать время проведения мониторинговых съемок, приурочив их к середине сезона, опираясь на информацию прежде всего о температуре поверхности воды, получаемую со спутников. Для гидрологической весны предпочтителен период, когда около 50% площади озера имеет температуру менее 4 °С. Для лета - период достижения наибольшего прогрева температуры поверхности воды. Для осени – период интенсивного выхолаживания и



перемешивания в результате которого выравнивается температура воды (до 6 градусов С) как на поверхности, так и на глубине в результате заглужения слоя температурного скачка.

- Плавсредства, на которых проводятся наблюдения, должны не только обладать современными средствами навигации и набором приборов для отбора проб воды и донных отложений, но и обеспечивать лабораторные условия для своевременной и оперативной обработки проб на химический и биологический анализы.

Выполнение мониторинга состояния экосистемы в зимний период требует отдельного рассмотрения. Наблюдений за качеством воды в период зимнего охлаждения и ледостава на Ладожском озере крайне мало. Они сопряжены со сложностью технического обеспечения наблюдений, особенно в периоды, когда наряду с открытой водой, часть озера находится подо льдом. Поэтому, эти наблюдения носят эпизодический характер, а их районы ограничены небольшим удалением от берега. Между тем, характер распространения речных и загрязненных вод в озере в зимний период коренным образом отличается от периода открытой воды.

Систему мониторинга Ладоги следует дополнить мониторингом водосборной территории с целью оценки притока воды и внешней нагрузки на озеро. Для этого необходимо организовать ежемесячные измерения расходов воды и отбор проб в замыкающих створах основных притоков – Волхова, Свири и Бурной. При этом следует обращать внимание на необходимость отбора проб воды на всех нормативно установленных вертикалях, а не только на прибрежных. Как показали исследования последних лет [3], для оценки и прогноза биогенной нагрузки с водосбора целесообразно использовать данные спутникового мониторинга о структуре подстилающей поверхности.

#### **Совершенствование системы оценки состояния озера**

В РД 52.24.309 дано описание методов классификации качества водных масс водотоков и водоемов по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды, а также по ряду гидробиологических показателей. Здесь же представлены градации оценки состояния экосистем по методу экологических модификаций. В соответствии с рекомендациями работы [11] дальнейшее совершенствование способов оценки качества воды и экологического состояния Ладожского озера, прежде всего, заключается в следующем.

- Разработка региональных значений предельно допустимых концентраций (ПДК), учитывающих естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений;
- Разработка и совершенствование нормативов допустимого воздействия (НДВ), а также экологически допустимых уровней воздействия (ЭДУ);
- Разработка и совершенствование нормативов на загрязнение донных отложений;

К сказанному можно добавить, что в настоящее время не только отсутствуют официально утвержденные региональные ПДК, но и нет ПДК для таких важнейших биогенных веществ, как общий фосфор ( $P_{\text{общ}}$ ) и общий азот ( $N_{\text{общ}}$ ), определяющих процесс эвтрофирования водоемов. В результате возникают многочисленные казусы, к числу которых, например, относится использование при расчетах НДВ для водосбора Финского залива в качестве ПДК по  $P_{\text{общ}}$  значений 160 и 190 мг/л [8,9] без указания происхождения этих цифр. Как зарубежные источники [15], так и российские [14] указывают, что такое содержание  $P_{\text{общ}}$  в воде соответствует высокоэвтрофным (гиперэвтрофным) водным объектам. Тем не менее, расчеты НДВ в приведенных примерах выполняются с ориентацией именно на такой уровень трофии, что недопустимо. В качестве адекватной системы оценки трофического статуса водоемов по содержанию  $P_{\text{общ}}$  с учетом гумусности воды, что актуально для условий северо-запада России, можно рассматривать классификацию, приведенную в табл.1 [4]. Разумно в качестве ПДК выбирать значения концентрации  $P_{\text{общ}}$  ниже значений, соответствующих эвтрофному статусу.

Классификация трофности вод по содержанию  $P_{общ}$  с учетом гумусности

	ультраолиго- трофные	олиго- трофные	мезо- трофные	эвтрофные	высоко- эвтрофные
Низкогумусные $P_{общ}$ , мкг/л	2	4	10	25	60
Мезогумусные $P_{общ}$ , мкг/л	2	5	12	30	75
Мезополигумусные $P_{общ}$ , мкг/л	2	6	15	40	95
Полигумусные $P_{общ}$ , мкг/л	3	8	20	50	125
	низкотрофные		среднетрофные		высокотрофные

### Совершенствование системы прогнозирования

Совершенствование методов прогнозирования изменения состояния Ладожского озера связано в первую очередь с разработкой, верификацией и последующим практическим использованием математических моделей. К настоящему моменту в ИНОЗ РАН разработан ряд моделей, описывающих тепломассоперенос в системе «атмосфера – водосбор – водоем - донные отложения», которые могут составить основу системы прогнозирования возможных изменений характеристик Ладожского озера под воздействием антропогенных и климатических воздействий. К их числу относятся:

- Детерминированно-стохастическая модель формирования стока и внешней биогенной нагрузки;
- Модель внутренней нагрузки;
- Гидродинамическая модель транспорта наносов;
- Одномерные модели FLake и FLakeEco термического и кислородного режимов водоема;
- Трехмерная модель гидродинамики и переноса растворенной примеси.

Детерминированно-стохастическая модель формирования стока и внешней биогенной нагрузки включает блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов, которые затем используются в качестве входа в детерминированные блоки модели, описывающих сток и вынос примесей с водосбора [2,3]. Итогом моделирования является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки.

Модель внутренней нагрузки основана на балансовой схеме представления основных потоков химического вещества (седиментации, захоронения и поступления из донных отложений в воду) в пограничной зоне «вода – дно». Рассчитывается суммарный поток со дна, формирующийся в результате действия различных механизмов. Разработаны две модификации метода – для крупных глубоководных водоемов, где массообмен на границе «вода – дно» происходит в стационарных (квазистационарных) условиях, и для мелководных водоемов, для которых характерна сезонная изменчивость условий формирования потоков [18].

Гидродинамическая модель транспорта наносов описывает неустановившийся речной сток с водосбора, транспорт наносов в русле реки, поступление наносов в озеро, а также гидродинамику водоема на основе двумерных уравнений «мелкой воды» в совокупности с переносом взвешенных частиц, их взмывом и переотложением. Последнее свойство позволяет рассчитывать пространственно - временные изменения морфометрических характеристик ложа водоема [16].

Модель FLake представляет собой универсальную одномерную математическую модель гидротермодинамики озера. On-line версия модели, а также программный код модели для некоммерческого использования приведены на сайте <http://lakemodel.net/> Модель FLakeEco предназначена для описания вертикального распределения концентрации растворенного

кислорода в период открытой воды и ледостава. Идейно и структурно является продолжением модели FLake, которая здесь выступает в роли гидротермодинамического блока. Модель также включает параметризацию фотосинтеза фитопланктона [17].

Трехмерная модель гидродинамики и переноса растворенной примеси основана на полной системе 3-х мерных уравнений геофизической гидротермодинамики. Воспроизводятся пространственная изменчивость топографии поверхности водоема и изменчивость среднего уровня водоема. Взаимодействие атмосферы и моря описывается через потоки импульса, тепла и влаги. Включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, намерзание, таяние) во льду и динамические процессы (движение, торошение и т.д.) [1]. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты моделирования распространения консервативной примеси по акватории Ладоги, поступившей со стоком реки Волхов. Расчеты показывают, что в зимние месяцы при наличии льда велика вероятность попадания примеси в район истока Невы с последующим ее переносом к водозаборам Санкт-Петербурга. В летние месяцы распространение примеси происходит вдоль восточного и северо-восточных берегов, что практически исключает ее попадание в бухту Петрокрепость.

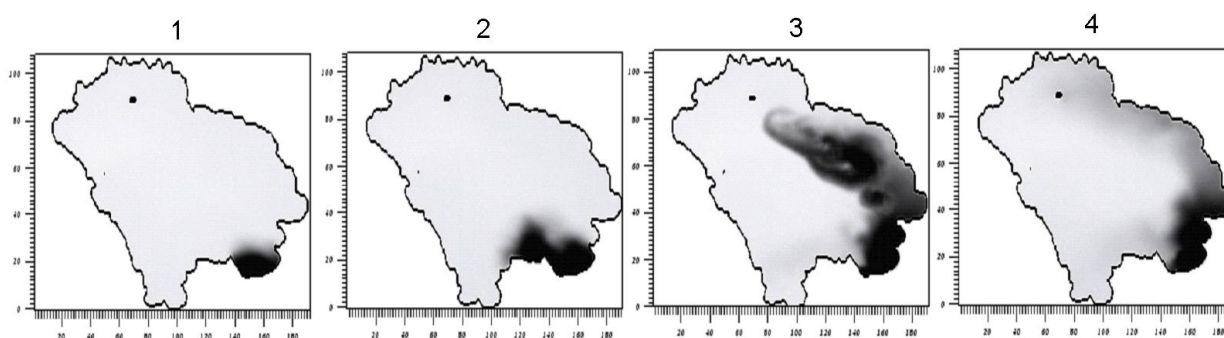


Рис.2. Распространение примеси, поступающей в Ладожское озеро со стоком реки Волхов, в различные периоды среднеклиматического года: 1 - январь, 2 - май, 3 -июль , 4 - ноябрь.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в настоящее время риски, связанные с возможным ущербом для здоровья людей за счет неудовлетворительного качества воды, поступающей в водозаборы Санкт-Петербурга, не контролируются существующей системой мониторинга водных объектов. На Ладожском озере, являющимся безальтернативным источником водоснабжения города, не проводятся наблюдения за токсикологическими и гидробиологическими характеристиками воды, отсутствует мониторинг донных отложений, являющихся источником вторичного загрязнения. Из сказанного следует необходимость принятия безотлагательных мер по выходу из сложившейся кризисной ситуации.

Предлагается в рамках Государственной программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» создать подпрограмму по сохранению водной системы Ладожского озера и обеспечению контроля за качеством воды и состоянием экосистемы в крупнейшем Европейском озере.

В настоящее время имеется достаточно серьезная научная основа для выхода из кризиса системы мониторинга Ладожского озера и других водных объектов северо-запада России. Для ее реализации потребуются совместные усилия Северо-западного УГМС и профильных научно-исследовательских институтов, прежде всего ИНОЗ РАН, при соответствующей поддержке реформации системы государственного мониторинга водных объектов со стороны Министерства природных ресурсов и экологии.

#### Литература:

1. Зверев И.С., Ушаков К.В., Шипунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А. Моделирование гидродинамики Ладожского озера – Настоящий сборник, 2016.
2. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря). СПб, Изд. Нестор-История, 2013, 36 с.
3. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Лозовик П.А., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования - Изв. РГО. 2016. №. 148, вып. 5, с. 53-63.
4. Лозовик П.А., Ефременко Н.А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике - Петрозаводск, 2016, 339 с.
5. Методические указания по организации и проведению наблюдений и контроля за загрязнением поверхностных вод суши в системе Общегосударственной службы наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК). Л.: Гидрометеиздат, 1977. 59 с.
6. Методические указания по принципам организации системы наблюдений и контроля за качеством воды водоемов и водотоков на сети Госкомгидромета в рамках ОГСНК. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 40 с.
7. Поздняков Ш.Р., Румянцев В.А., Иванова Е.В. Оценка количества частиц субмикронного диапазона в водных объектах бассейна Ладожского озера – Настоящий сборник, 2016.
8. Приложения к пояснительной записке к сводному тому нормативов допустимого воздействия по бассейну реки Луга и рек бассейна Финского залива (от северной границы бассейна реки Луга до южной границы реки Нева) – СПб, 2015а, 29с.
9. Приложения к пояснительной записке к сводному тому нормативов допустимого воздействия рек и озер бассейна Финского залива (от границы Российской Федерации до северной границы бассейна реки Нева) – СПб, 2015б, 29с.
10. РД 52.24.309-2011 Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием загрязнением поверхностных вод суши – ГХИ, 2012, 188с.
11. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рябченко В.А., Басова С.Л., Шмакова М. В. Основные факторы, определяющие функционирование водной системы Ладожское озеро — река Нева — Невская губа — восточная часть Финского залива в современных условиях // Известия РГО. СПб.: наука, 2012. Т. 144, вып. 2. С. 55-69.
12. Совершенствование мониторинга состояния экосистемы и качества воды Ладожского озера и реки Невы – Отчет по Государственному контракту №24-НИОКР/4-5-2012 Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах», СПб, 2013, 170 с.
13. Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера – в кн. Тепловой режим Ладожского озера, под. ред. С.В. Калесника – Л., Изд-во ЛГУ, 1968, с.144 – 217.
14. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб: Гидрометеиздат, 1993. 278 с.
15. Хендерсон – Селлерс Б. Инженерная лимнология. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 336с.
16. Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Кондратьев С.А. Детерминированно-стохастическое моделирование заиления водоема речными наносами – Настоящий сборник, 2016
17. Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdrovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes - *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331-340.
18. Ignatieva N.V. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the eastern Gulf of Finland - *Boreal Environment Research*. 1999. V. 4. P. 295–305.

## BASIC DIRECTIONS OF THE MONITORING SYSTEM OF LAKE LADOGA IMPROVEMENT

Shamil R. Pozdniakov  
DSc, Director  
Institute of Limnology RAS  
e-mail: [lake@limno.org.ru](mailto:lake@limno.org.ru), [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)  
Sergey A. Kondratyev  
DSc, Deputy Director  
Institute of Limnology RAS  
e-mail: [kondratyev@limno.org.ru](mailto:kondratyev@limno.org.ru)

*Abstract:* The proposals for improving the monitoring of Lake Ladoga in the present conditions were formulated. They relate to the development of the sampling system in the Lake, assess its state, as well as the forecast of possible changes under the influence of anthropogenic and climatic influences.

*Key words:* Lake Ladoga, monitoring, sampling system, state assessment, forecasting and modeling

## **НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ – ВАЖНЫЙ КОМПОНЕНТ ПОВЫШЕНИЯ РОЛИ И ЗНАЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ**

Комарицын Анатолий Александрович,  
д.т.н., профессор  
Нестеров Николай Аркадьевич,  
д.т.н., профессор  
ИНОЗ РАН

Одним из важных направлений развития экономических связей, водного туризма и рекреационной деятельности в нашей стране является повышение роли и значения транспортной системы внутренних водных путей (ВВП).

Открытие ВВП для плавания судов под флагами иностранных государств в соответствии с Постановлениями Правительства РФ от 2008 г. N 85 "Об утверждении Положения о получении разрешения на право плавания судов под флагом иностранного государства по внутренним водным путям Российской Федерации" и от 2012 г. N 472 "Об утверждении Правил плавания по внутренним водным путям Российской Федерации спортивных парусных судов и прогулочных судов под флагами иностранных государств" ещё острее поставило проблему развития и поддержания на уровне современных международных требований существующей системы обеспечения безопасности судоходства на ВВП.

Важными компонентом этой системы является навигационно-гидрографическое обеспечение, которое, в данном случае, в первую очередь подразумевает проведение гидрографических работ и обеспечение судоводителей достоверными бумажными и электронными картами.

Развитие водного туризма и рекреационной деятельности предполагает широкое использование маломерных судов. Возможности Ленинградской области по развитию маломерного флота определяются природно-географическими условиями, её индустриальным развитием и наличием крупных населённых пунктов на берегах водных объектов.

Значительные площади области расположены на побережье Балтийского моря (Финского залива). В области находятся 1800 озёр. При этом Ладожское озеро является крупнейшим в Европе (18,135 тысяч квадратных километров). Общая протяжённость всех рек в Ленинградской области составляет около 50 тысяч километров. Крупнейшими реками являются Нева, Свирь, Волхов, Вуокса.

Совокупность природных, культурно-исторических и социально-экономических предпосылок для организации рекреационной деятельности в области свидетельствует о потенциальных возможностях развития туризма, отдыха и других видов рекреационного природопользования, и прежде всего, рекреационного водопользования. Это обусловливается уникальным географическим положением, значительным природно-климатическим потенциалом для развития туризма, санаторного лечения и отдыха, наличием достопримечательностей, богатым историко-культурным наследием, развитой транспортной инфраструктурой, возможностью использования сложившейся структуры экономики в интересах становления и развития туризма и рекреации.

На берегах водных объектов и в непосредственной близости от них расположены населённые пункты, памятные места, объекты исторического наследия, а также значительное количество территорий, имеющих большое рекреационное значение. Геополитическое значение области определяется общей границей с Европейским Союзом. Сочетание этих условий с развитой сетью наземного транспорта определяет преимущественно туристско-экскурсионного и рекреационного направления развития маломерного флота.

В то же время сопоставление динамики изменения количества маломерных судов и объектов базирования в Ленинградской области за последние годы свидетельствует об одновременном росте количества маломерных судов и уменьшении количества объектов базирования. Вместе с

тем, имеет место повышение требований к объектам базирования, в том числе к уровню навигационно-гидрографического обеспечения и сопутствующему сервису со стороны владельцев маломерного флота.

Принятие соответствующих мер по навигационно - гидрографическому обеспечению маломерного флота и объектов базирования Ленинградской области станет одной из гарантий безопасного плавания и позволит повысить привлекательность водных объектов региона в транспортном, туристическом и рекреационном отношениях.

Постановлением Правительства РФ № 587 от 20.08.2001г. предусмотрено создание электронных карт и баз данных для навигационно-гидрографического обеспечения ВВП России. К сожалению, не всех ВВП и отдельных рек и озер Ленинградской области коснулось это постановление. Нет необходимости доказывать важность современного картографического материала в целях экономики области, для обеспечения безопасности плавания маломерных судов и яхт, развития водного туризма, создания зон отдыха на берегах водоёмов, решения экологических проблем и т.д.

Водный транспорт - старейший из видов транспорта в области. По её малым рекам и озёрам - проселочным водным дорогам в былые времена перемещались суда и баржи, перевозившими пассажиров и грузы различными товарами. Характерным примером может служить река Россонь. В начале XX века на ней работали пароходы «Рейн», «Май», водоизмещением 59 тонн и многие другие. В советский период с 1950 по 1974 год было возобновлено сообщение на реке теплоходами «Быстрый» и «Москвич», которые делали остановку в 13 населенных пунктах! В настоящее время, несмотря на то, что распоряжением Правительства РФ река Россонь отнесена к внутренним водным путям, водный транспорт не развит, водный туризм и регулярное сообщение отсутствуют. Аналогичная ситуация и со многими другими водоемами Ленинградской области. Одной из очевидных причин нерешённости этой проблемы - отсутствие современных карт. Так, например, последний картографический материал на систему озер Вуокса датируется 1938г.

По обилию вод Ленинградская область занимает одно из первых мест в мире. В области развёрнуто широкое строительство современных морских портов. Многие реки могут служить транзитными артериями по перевозке грузов из этих портов речным транспортом.

Сегодня маломерный водный транспорт динамично развивается, появляются новые направления его деятельности, в последнее время быстрыми темпами растёт количество личных катеров и яхт. Уже имеется разрешение для зарубежных любителей отдыха на воде путешествовать по нашим рекам и озёрам.

Всё это настоятельно требует проведения комплекса гидрографических и картографических работ по созданию карт и описаний, на основе которых можно создать атлас ВВП, рек и озер Северо-запада. Такой атлас станет важным документом по вопросам планирования и осуществления навигационно-гидрографического обеспечения плавания, организации проведения путевых, дноуглубительных и руслоочистительных работ для обеспечения безопасности судоходства, а также для использования в качестве справочного и вспомогательного материала при решении широкого круга иных научных, учебных и прикладных задач, в том числе при организации туризма и другой рекреационной деятельности. Структурно атлас, по-видимому, должен включать непосредственно карты рек и озёр и разделы посвященные навигационно-гидрографическому и гидрологическому описаниям. В гидрометеорологическом очерке целесообразно привести сведения об условиях плавания судов в период навигации. В атласе должны быть представлены климатические особенности сезонов навигации. Приведены сведения о течениях, волнении, температуре, прозрачности и цвете воды, по температуре и влажности воздуха, туманах, видимости и радиолокационной наблюдаемости.

В атласе необходимо достаточно подробно дать описание:

- гидрологического режима;
- колебаний уровня воды, связанных в основном со сгонно-нагонными явлениями;
- описание берегов рек и озёр, и островов, омываемых ими;
- ледового режима.

В общем, комплекс мероприятий по созданию наиболее благоприятного в навигационно-гидрографическом отношении обеспечения судоходства, рекомендованных маршрутов (фарватеров, судовых ходов и каналов), очевидно, должен включать:

1. Проведение анализа гидрографической изученности акваторий водных объектов и средств навигационного оборудования и выдачи рекомендаций по очередности проведения НГО.
2. Производство комплекса гидрографических работ для выявления новых гарантированных габаритов судовых ходов и фарватеров по естественным глубинам.
3. Производство картографических работ для обеспечения картографическим материалом акваторий водных объектов и их прибрежных территорий.
4. Приведение картографических материалов на уровень современности (корректурa навигационных и других карт и навигационных пособий).
5. Реализация карт и навигационных пособий с доведением до конкретного потребителя, доведение навигационной информации до всех судоводителей.
6. Проведение комплекса работ по проектированию и реализации проекта единой системы СНО.
7. Создание формуляров наиболее важных в навигационно-гидрографическом отношении мест стоянки маломерных судов, формуляров зон отдыха на воде и маршрутов водного туризма.

Комплекс гидрографических и картографических работ позволит в короткий срок:

- создать в Ленинградской области эффективную систему обеспечения потребителей, включая суда под флагами иностранных государств, картографической продукцией в бумажной и цифровой формах, соответствующей международным требованиям и стандартам;
- повысить уровень безопасности судоходства на внутренних водных путях;
- повысить эффективность использования бюджетных средств для решения наиболее актуальных проблем улучшения судоходства;
- перейти на более современное представление картографической информации в аналоговой и цифровой форме, удобной для её поддержания на уровне современности;
- сократить сроки переиздания картографической продукции, привлечь для этой цели внебюджетные средства, получаемые от реализации.

Привлечение к работам квалифицированных частных подрядчиков с развитыми производственными мощностями и опытом работы в области картографии и обеспечения безопасности судоходства позволит значительно сократить объем капиталовложений в создание собственных производственных мощностей и уменьшить расходы на подбор, обучение и подготовку кадров.

В связи с вышеизложенным предлагается:

1. Рассмотреть вопрос о создании систематического картографического материала на ВВП, реки и озера области (Атласа ВВП, рек и озер).
2. Произвести работы по обобщению имеющейся гидрографической информации для подготовки и издания Атласа ВВП. В Атласе кроме карт и описаний целесообразно включить извлечения из действующих нормативных правовых актов, правил и рекомендаций, направленных на обеспечение безопасности судоходства и другие необходимые судоводителям сведения.
3. Обеспечить выполнение работ информационными материалами по существующей инфраструктуре ВВП, рек и озер Ленинградской области (стоянки, заправки топливом, медпункты, гостиницы, пункты общественного питания), зонах отдыха на воде, маршрутах водного туризма.
4. Подготовить предложения по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства на рекомендованных путях, фарватерах и каналах. Обеспечить приведение картографических материалов и навигационных пособий на уровень современности.
5. Подготовить и провести комплексные мероприятия по выявлению гарантированных габаритов судовых ходов по естественным глубинам. Разработать проект единой системы средств навигационного оборудования на ВВП, реках и озерах.
6. Провести анализ состояния существующих и определить перспективные зоны отдыха и маршруты водного туризма на реках и озерах. Подготовить предложения по их развитию и навигационно-гидрографическому обеспечению водного туризма и охраны окружающей среды.
7. Разработать систему реализации карт и навигационных пособий с доведением до конечного потребителя.
8. Создать организационный комитет с участием ведущих специалистов в этой области. Разработать план навигационно-гидрографического обеспечения и провести научно-техническое проектирование производства гидрографических работ и навигационного оборудования ВВП.



Для решения этой поистине важной для области задачи необходимо привлечь силы и средства научных и производственных организаций различных ведомств ведущих гидрографических компаний, имеющих большой опыт работ по картографированию и навигационному оборудованию морских акваторий, рек, озер и внутренних водоемов.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КОНЦЕ XX - НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ

Евгений Александрович Курашов,  
д.б.н., профессор, заведующий лабораторией гидробиологии,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [evgeny\\_kurashov@mail.ru](mailto:evgeny_kurashov@mail.ru);

Лариса Леонидовна Капустина,  
к.б.н., старший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [larisa.kapustina@mail.ru](mailto:larisa.kapustina@mail.ru);

Марина Александровна Барбашова,  
к.б.н., научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [mbarba@mail.ru](mailto:mbarba@mail.ru);

Дина Сергеевна Дудакова,  
к.б.н., научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru);

Галина Геннадьевна Митрукова,  
к.б.н., младший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [galya-21@mail.ru](mailto:galya-21@mail.ru);

Елена Викторовна Протопопова,  
научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [ephyto@mail.ru](mailto:ephyto@mail.ru);

Наталья Владимировна Родионова,  
научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [nleptodora@gmail.com](mailto:nleptodora@gmail.com);

Ирина Викторовна Иофина,  
научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

E-mail: [irinaio@yandex.ru](mailto:irinaio@yandex.ru)

*Аннотация:* Регулярные исследования основных биологических сообществ (фитопланктон, водные грибы, бактериопланктон, зоопланктон, макро- и мейобентос) открытой акватории крупнейшего в Европе озера Ладожского выявили основные тенденции изменения его экосистемы в конце XX - начале XXI веков. В целом, современное состояние озера может быть охарактеризовано как благоприятное.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, фитопланктон, водные грибы, бактериопланктон, зоопланктон, макрозообентос, мейозообентос

### **Введение**

Оценка качества поверхностных вод, как среды обитания гидробионтов в условиях меняющегося климата, в настоящее время является приоритетной научной задачей. Особое значение для всего региона Северо-Запада имеет крупнейшее в Европе озеро Ладожское. Мониторинг его экологического состояния жизненно необходим для решения самых разнообразных задач научного и практического характера.

Несмотря на отмечавшуюся уже некоторую стабилизацию экологических условий в Ладожском озере[1], проблема улучшения качества его воды продолжает оставаться актуальной. Управление водными ресурсами невозможно осуществлять без проведения мониторинговых работ на озере.

Изменения в биологических сообществах озера наиболее активно происходили начиная с последней трети XX века, во многом, в результате воздействия антропогенного фактора. Однако, можно ожидать, что природные процессы будут продолжать оставаться определяющими в формировании и функционировании биоценозов озера. Это следует из-за того, что являясь огромным глубоководным водоемом с весьма замедленным водообменом, Ладожское озеро по природе своей обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Гомеостаз озерной экосистемы также поддерживается за счет внутренних структурных перестроек сообществ гидробионтов, что в целом приводит к стабильному состоянию озерной биоты.

Характерные изменения сообществ гидробионтов под воздействием антропогенного фактора наиболее сильно проявляются в зонах, прилегающих к источникам повышенной антропогенной нагрузки [2]. В этих случаях характеристики развития водных организмов могут выступать надежными критериями оценки экологического состояния водной среды.

Проводимые в Институте озероведения РАН исследования по оценке состояния биотической компоненты экосистемы Ладожского озера при воздействии природных и антропогенных факторов в условиях меняющегося климата по своей комплексности имеют мало аналогов среди лимнологических исследований во всем мире. Основной целью проводимых исследований является получение комплексных новейших данных по всем основным биологическим сообществам озера, что наряду с имеющимися многолетними рядами позволяет оценить экологическое состояние озера и тенденции его изменения в современных условиях.

#### **Материал и методы**

Материалом для настоящей публикации послужили результаты комплексных регулярных исследований всех основных биологических сообществ (фитопланктон, бактериопланктон, водные грибы, зоопланктон, макро- и мейобентос), крупнейшего в Европе озера Ладожского, полученные в период с начала 90-х годов XX века по настоящее время.

Методы исследования указанных выше сообществ гидробионтов подробно описаны в изданиях [2, 3].

#### **Результаты и обсуждение**

Регулярные исследования всех основных биологических сообществ (фитопланктон, бактериопланктон, водные грибы, зоопланктон, макро- и мейобентос) открытой акватории крупнейшего в Европе озера Ладожского показали, что характер изменения его экосистемы в последней трети 20-го и начале 21-го веков носит сложный характер. В 70-х и 80-х годах интенсивно развивалось антропогенное эвтрофирование озера. Закономерным завершением этого процесса стала трансформация всей озерной экосистемы в более трофное состояние (достижение мезотрофного статуса) только к концу 20-го века и дестабилизация функционирования экосистемы [4], что было зафиксировано особенно наглядно по изменению мейобентоса открытой зоны Ладожского озера [5]. Период экосистемной дестабилизации (1998-2004 гг) характеризовался образованием в профундальных биотопах Ладоги скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов из-за внутренней интоксикации экосистемы озера ионами металлов, последовавшей вслед за разрушением консервативной высокомолекулярной фракции РОВ. Кроме этого явления для данного периода были выявлены следующие наиболее важные статистически значимые тенденции:

а) для прибрежной зоны: увеличение бактериальной численности, увеличение концентрации органического вещества, увеличение плотности олигохет;

б) для декардинальной зоны: увеличение концентрации общего фосфора, уменьшение концентрации кислорода, увеличение численности и биомассы олигохет, амфипод и всего бентоса;

в) для профундальной зоны: уменьшение бактериальной численности; увеличение концентрации общего фосфора; уменьшение концентрации органического вещества, увеличение плотности олигохет;

г) для ультрапрофундальной зоны: уменьшение концентрации лабильного органического вещества; увеличение концентрации хлорофилла; уменьшение концентрации кислорода, увеличение численности и биомассы олигохет и всего бентоса, увеличение концентрации общего фосфора.

Начало постмезотрофного периода (примерно с 2007 г.) состояние экосистемы озера маркируется прекращением образования скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов в донных биотопах профундали и возвращением структуры и количественного развития мейобентоса к той, которая наблюдалась в олиготрофный период состояния экосистемы.

Проведенные в последующие годы исследования всех сообществ открытой зоны Ладожского озера не выявили никаких тенденций ухудшения качества озерной среды. Более того, полученные данные говорят о стабильном состоянии озера и, даже, об улучшении качества его вод.

Исследования фитопланктона последних лет показали, что значения численности, биомассы и хлорофилла-а (например, в 2015 г. среднее значение хлорофилла-а для озера составило  $5,1 \pm 0,9$  мкг/дм<sup>3</sup>) для озера находятся в пределах многолетних колебаний этих параметров, что позволяет охарактеризовать Ладожское озеро в летний период как мезотрофный водоем. Большинство исследованных станций относятся к 1 классу качества воды, некоторые немногие ко 2 классу качества воды.

Величины микробиологических параметров, полученные для Ладожского озера вплоть до 2015 г., отражают характерный уровень развития бактериального сообщества, свойственный этому водоему, естественно, с определенными межгодовыми колебаниями (рис. 1). Межгодовые изменения среднелетних величин общей численности бактериопланктона в период с 2000 г. по настоящее время менее значительны по сравнению с предшествующим периодом исследований, особенно в гиполимнионе. Максимальный разброс величин за этот период в эпи- и гиполимнионе составлял 1,7 и 1,6 раз, соответственно, тогда как в период 1994 – 1999 гг. в эпи- и гиполимнионе максимальные величины превышали минимальные в 2 и 3 раза, соответственно. Еще более существенные колебания отмечались до 1994 г. Характер пространственно–временного распределения микробиологических параметров в последние годы также характеризуется определенной стабильностью и определяется, в основном, особенностями гидрофизического режима и развития фитопланктона Ладожского озера. Судя по величинам общей численности бактериопланктона, характерной для озера в последние годы, Ладога не выходит за границу мезотрофного состояния.

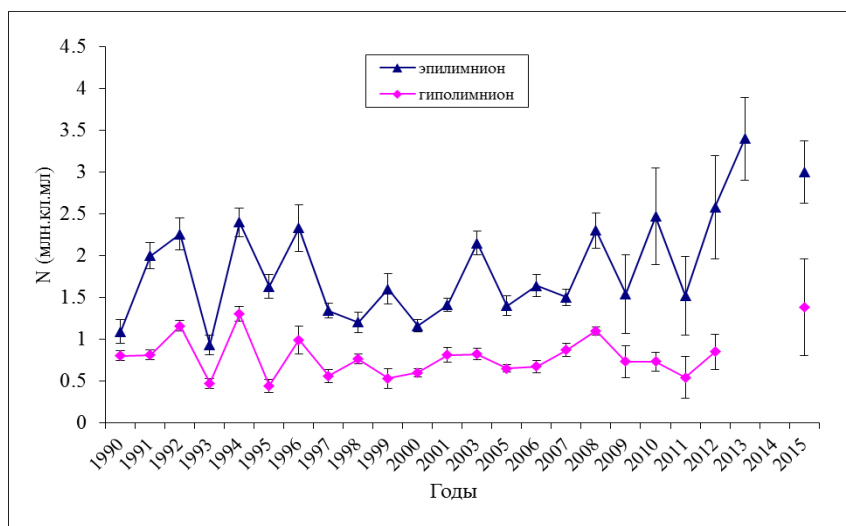


Рис. 1. Динамика общей численности бактериопланктона ( $N$ , среднелетние величины, млн. кл./мл) в эпи- и гиполимнионе Ладожского озера.

Исследования водной микрофлоры Ладожского озера показали, что для всех районов озера характерны относительно низкие значения численности водных грибов. С 2001 года средняя численность микопланктона по акватории озера колебалась от 500 до 900 пропагул/л.

Рассмотрение динамики и количественного развития зоопланктона центральной части Ладожского озера после 1990г. не выявило выраженных тенденций его изменения. В пелагиале глубоководной части Ладожского озера, как правило, преобладают коловратки и копеподы. Для сетного планктона за 15 лет средние значения численности в слое 0 -10 м составили -  $19 \pm 4$  тыс.экз./м<sup>3</sup>, а биомассы -  $731 \pm 140$  мг/м<sup>3</sup>. Как особенность зоопланктона в слое эпилимниона отмечается преобладание аспланхны (38% общей биомассы). Однако в последние годы ее значение в биомассе не было стабильным и, наоборот, отмечается увеличение в общей биомассе доли *Bosmina (Eubosmina) longispina* Leydigi крупных кладоцер (до 40%).

Таким образом, за последние годы в структуре и количественном развитии зоопланктонного сообщества центральной части Ладожского озера не произошло каких-либо серьезных изменений, что позволяет, по прежнему, оценивать основную акваторию Ладожского озера, согласно принятым классификациям [6] как слабomezотрофную (при олиготрофном характере гипolimниона).

Исследования макрозообентоса открытой акватории Ладоги показали, что видовой состав середины XX века не претерпел существенных изменений, но обогатился в прибрежной и литоральной зоне за счет видов-вселенцев.

С увеличением глубины разнообразие и количественные показатели (численность, биомасса) макробентоса понижаются, в составе донного сообщества увеличивается доля олигохет. Наиболее продуктивной зоной озера является переходный район (глубины 18–50 м), где в массе развиваются амфиподы (прежде всего *Monoporeia affinis* (Lindström)). Показатели количественного развития макробентоса низки в северных глубоководных участках Ладожского озера (глубоководная зона, включая впадины) (диапазон изменений 0,04–5,82, в среднем  $1,26 \pm 0,34$  г/м<sup>2</sup>) и существенно выше в южных (диапазон изменений 0,01–28,00, в среднем  $4,01 \pm 0,34$  г/м<sup>2</sup>). Уровень развития макробентоса в бухте Петрокрепость и Свирской губе соответствует таковому в олиготрофных и слабо мезотрофных водоемах, а в Волховской губе – типично мезотрофных. В районах впадин, глубоководном, склоновом и озерного уступа видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп и количественное развитие продолжают оставаться достаточно стабильными после 2005 г. В этот период произошло общее снижение количественного развития макробентоса в центральной зоне озера по сравнению с периодом экосистемной дестабилизации (примерно десятилетие с середины 90-х годов XX в.) (табл. 1).

Макробентос южной части озера характеризуется высокой пространственной и временной вариабельностью как видовой состава и структуры донных сообществ, так и их количественных показателей.

По данным последних лет в исследованном юго-западном районе озера видовой состав, структура сообщества донных беспозвоночных меняются незначительно по сравнению с предыдущими годами. Количественные показатели макрозообентоса находятся в пределах межгодовой изменчивости, характерной для данной акватории озера. Биоиндикация по показателям макробентоса (видовой состав, уровень количественного развития донных беспозвоночных, их относительная стабильность, биоиндикационные индексы) характеризует юго-западную зону как незагрязненную, показывает высокое качество воды в этом районе озера.

Характер современного распределения амфипод в озере (за исключением, прибрежной и литоральной зон) мало отличается от их распределения в 1930-е годы. Не установлено отрицательного влияния антропогенного эвтрофирования и существующего уровня загрязнения на реликтовую фауну Ладожского озера.

Таблица 1

Оценка различий между периодами исследований по показателям численности ( $N$ ,  $X \pm SE$ , экз./м<sup>2</sup>) и биомассы ( $B$ ,  $X \pm SE$  г/м<sup>2</sup>) макробентоса (по результатам однофакторного дисперсионного анализа) в центральной зоне Ладожского озера

Показатель	Период исследования				F	p
	1960 – 1961**	1975 – 1986***	1993 – 2005	2006 – 2012		
Станция 55						
N	346 ± 370	552 ± 107	1248 ± 135	936 ± 166	6, 794	0,00 067*
B	0,64 ±1,07	1,82 ± 0,31	4,18 ± 0,39	2,20 ± 0,48	8, 361	0,00 015*
Станция 82						
N	184±2 56	399±9 3	1005±8 8	516±12 1	7, 705	0,00 036*
B	0,33± 0,73	1,08±0 ,27	2,98±0, 25	1,11±0, 34	10 ,363	0,00 003*

Примечание: \* – значимые различия; \*\* – архивные материалы Г.А. Стальмаковой; \*\*\* – архивные материалы Т.Д. Слепухиной.

Оценка изменений структуры и продукционных характеристик сообщества мейобентоса на прибрежных и глубоководных станциях за период с 2007 показала отсутствие нарушений и стабильное функционирование донных сообществ. Уровень количественного развития мейобентоса (особенно в профундальной и ультрапрофундальной зонах) стал близок к тому, который был характерен для олиготрофного периода экологического состояния озера (рис. 2). Для наиболее подверженной риску антропогенного загрязнения Волховской губы также отмечено продолжающееся в последние годы улучшение состояния сообщества. Наблюдения за динамикой изменения структуры мейобентосного сообщества в центральной акватории озера за последнее десятилетие показали тенденцию улучшения качества воды, что выявляется исчезновением скоплений диапаузирующих циклопов.

По-видимому, до сих пор продолжающийся постмезотрофный период развития Ладожского озера характеризуется тем, что эволюция экосистемы приобрела «гистерезисный» характер[7], а возвращение экосистемы в менее трофное состояние сопровождается возвращением многих параметров развития различных сообществ гидробионтов к значениям, близким к характерным для природного состояния озера уровням. Вместе с тем, при детальном рассмотрении наблюдается формирование и новых специфических черт и характеристик основных сообществ водоема, что определяет совершенно новый этап в развитии экосистемы Ладоги.

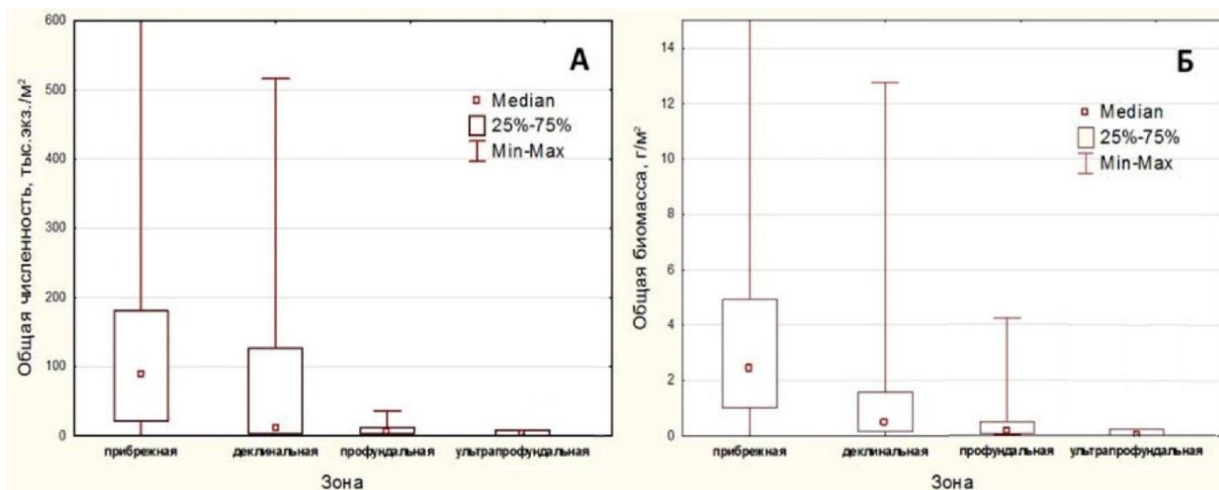


Рис.2. Средние значения количественных показателей мейобентоса (А – численность, Б – биомасса) в разных зонах Ладожского озера (прибрежная, деклиная, профундальная, ультрапрофундальная) в период после 2007 г.

Объединяя данные по всем основным гидробиологическим сообществам, на основании исследований 2007-2015 гг. можно заключить, что трофический статус центральной части акватории озера в целом оценивается как слабomezотрофный (при олиготрофном характере гипolimниона), северной – как олиготрофный, западной – как мезотрофный, южной части (Свирская и Волховская губы) – как слабоэвтрофный.

Воды Ладожского озера могут быть охарактеризовано как «чистые» и «очень чистые» за исключением отдельных акваторий в районе «горячих точек»[2], где загрязнение и эвтрофирование могут вызывать определенные локальные нарушения состояния озерной среды.

В настоящее время вектор развития экосистемы озера и его притоков определяется, в основном, естественными факторами природной среды в конкретных климатических условиях.

#### Литература:

1. Ладога / ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев. — СПб. : Нестор-История, 2013. — 468 с.
2. Литоральная зона Ладожского озера / под ред. Е. А. Курашова. – СПб. : Нестор-История, 2011. – 416 с.
3. Литвинов М.А., Дудка И.А. Методы исследования микроскопических грибов пресных и соленых (морских) водоемов. – Л.: Наука, 1977. – 151 с.
4. Петрова Н.А. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования/ Н.А. Петрова, Т.Н. Петрова, О.М. Сусарева, И.В. Иофина // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 5. – С. 580-589.
5. Курашов Е.А. Деэвтрофирование Ладожского озера: свидетельство структурной организации и количественного развития мейобентоса/ Е.А.Курашов, Д.С.Дудакова // Экология водных беспозвоночных. Сборник материалов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Ф.Д. Мордухай-Болтовского. Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д.Папанина РАН, Борок, 30 октября – 2 ноября 2010 г. – Ярославль: Принтхаус, 2010. – С. 163-167.
6. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. – М.: Наука, 1984. – 309 с.
7. Поздняков Д.В., Коросов А.А., Петрова Н.А., Петтерссон Л.Х., Грассл Х. Исследование «гистерезисного» характера возвращения Ладожского озера из мезотрофного состояния/ Д.В. Поздняков, А.А. Коросов, Н.А. Петрова, Л.Х. Петтерссон, Х. Грассл// Исследование Земли из космоса. –2009. –№ 1. –С.45-59.

## CURRENT STATE OF THE ECOSYSTEM OF LAKE LADOGA AND TENDENCIES OF ITS CHANGE IN THE LATE XX - EARLY XXI CENTURIES

Evgeny A. Kurashov,  
Dr. Biol. Sci., Professor, Head of laboratory of Hydrobiology,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [evgeny\\_kurashov@mail.ru](mailto:evgeny_kurashov@mail.ru);

Larisa L. Kapustina,  
Ph.D., senior researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [larisa.kapustina@mail.ru](mailto:larisa.kapustina@mail.ru);

Marina A. Barbashova,  
Ph.D., researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [mbarba@mail.ru](mailto:mbarba@mail.ru);

Дина Сергеевна Дудакова,  
Ph.D., researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru);

Galina G. Mitrukova,  
Ph.D., junior researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [galya-21@mail.ru](mailto:galya-21@mail.ru);

Elena V. Protopopova,  
researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [ephyto@mail.ru](mailto:ephyto@mail.ru);

Natalia V. Rodionova,  
researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [nleptodora@gmail.com](mailto:nleptodora@gmail.com);

Irina V. Iofina,  
researcher, Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: [irinaio@yandex.ru](mailto:irinaio@yandex.ru)

*Abstract:* Regular surveys of all major biological communities (phytoplankton, water fungi, bacterioplankton, zooplankton, macro - and meiobenthos) in the largest European Lake Ladoga revealed the main trends in its ecosystem transformation in the last third of the 20<sup>th</sup> and early 21<sup>st</sup> centuries. By and large, the current state of the lake may be characterized as favourable.

*Keywords:* Lake Ladoga, phytoplankton, water fungi, bacterioplankton, zooplankton, macrozoobenthos, meiozoobentos.



## ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОСБОРА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Владислав Александрович Румянцев,  
академик РАН, научный руководитель ИНОЗ РАН

e-mail: [lake@limno.org.ru](mailto:lake@limno.org.ru)

Шамиль Рауфович Поздняков,  
д.г.н., директор ИНОЗ РАН

e-mail: [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)

Елена Фёдоровна Чичкова  
к.г.н., зам. директора

ЦКУ "КосмоИнформ-Центр" ГУАП

Ладожское озеро – крупнейший пресный водоем Европы и безальтернативный источник водоснабжения Санкт-Петербурга и ряда городов и населенных пунктов Ленинградской области и Республики Карелия. Качество воды Ладоги в значительной мере определяется негативными антропогенными процессами, которые имеют место на водосборе озера. Значительную роль в них занимают заброшенные полигоны отходов предприятий оборонной промышленности и навозохранилища, а также несанкционированные свалки бытовых отходов. Последние содержат часто строительные красители, относящиеся к стойким органическим загрязнителям и представляющие огромную угрозу для здоровья людей. Во время дождей и снеготаяния хранящиеся на полигонах и свалках опасные химические загрязнения по водотокам поступают в Ладогу и воздействуют на экосистему озера. Выявление заброшенных полигонов и несанкционированных свалок на практике представляет серьезную проблему. Для ее решения весьма перспективным представляется использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1,3].

В 2014-2015г.г. были проведены совместные работы института «Озероведения» РАН и ЦНИИ РТК по оценке экологического состояния водосбора Ладожского озера в рамках Государственного задания СПбНЦ РАН. Выполненными работами по идентификации свалок, полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) методами ДЗЗ, включающими в себя космическую съемку и съемку с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), решены следующие задачи [2,4]:

- дешифрирование космических снимков и выдача целеуказаний;
- проведение маршрутных исследований и съемки с БПЛА;
- обработка информации с БПЛА;
- анализ полученных результатов.

Для проведения работ использовались данные космических аппаратов (КА) RapidEye за период 2012-2013 гг. Данные с космического аппарата RapidEye были выбраны для отработки методики по определению состояния берегов Ладожского озера из-за оптимального соотношения цены и качества космической съемки. Каждый снимок RapidEye включает в себя данные в пяти спектральных диапазонах видимой и ближней инфракрасной съемки с пространственным разрешением - 6,5 м. Проведенные исследования по дешифрированию снимков RapidEye показали, что схожими спектральными характеристиками (повышенная яркость в видимом диапазоне) кроме свалок отходов (бумага, пластик, битое стекло) обладают также некоторые объекты инфраструктуры (бетон, железо, асфальт) и карьеры. Поэтому распознавание такого рода свалок в автоматическом режиме при помощи классификационных методов не представляется возможным. Дешифрирование снимков производилось визуальным способом по следующей методике:

1) выбор ярких зон на снимках (высокие коэффициенты отражения в красном, зеленом и голубом каналах).

2) выбор отражающих зон меньшим отражением, претендующих на сельскохозяйственные, и промышленные свалки (по текстурным признакам - зернистая текстура, образующаяся за счет неровностей поверхности свалок).

3) проверка формы зон (обычно свалки достаточно компактны, полигоны ТБО имеют прямоугольную форму и четко очерчены водосточными канавами).

4) учет месторасположения (несанкционированные свалки расположены вдоль дорог и, как правило, отделены от дорог лесной полосой; иногда свалки расположены на карьерах или вблизи карьеров из-за подъездных дорог и хорошей доступности; рядом со свалками должны находиться города, поселки, садоводства).

5) учет наличия вблизи потенциальной свалки водного объекта (по тематическому заданию требовалось произвести отбор проб воды на токсикологический анализ).

Всего по результатам дешифрирования снимков были даны 15 целеуказаний на обследование для проведения маршрутных исследований и съемки БПЛА в 2014 году [2,4] и 13 - в 2015 году. В качестве целеуказаний использовались координаты центральной точки обнаруженного по космической съемке объекта. К потенциально опасным объектам по результатам дешифрирования были отнесены карьеры, свалки и полигоны ТБО.

По обнаруженным координатам потенциальных свалок были проведены экспедиционные работы, которые заключались в полевых выездах на каждую точку. По прибытии в район исследований с указанными координатами, проводились наземная фотосъемка. Также осуществлялся запуск беспилотного летательного аппарата (БПЛА) *Dji phantom 2* с подвешенной камерой высокого разрешения *Go Pro 3* и видео съемка с высоты 100-1200м. В ближайших к объектам целеуказаний водоемах отбиралась проба воды для дальнейших токсикологических исследований.

В результате проведенного аэрокосмического мониторинга состояния южных берегов Ладожского озера в 2015 году были обнаружены 2 полигона ТБО, 4 карьера и 3 несанкционированные свалки. Ложные целеуказания по космической съемке были опровергнуты данными с БПЛА. В основном они объясняются схожестью грунтовых площадок у дорог по качеству покрытия, размерам и форме с небольшими свалками. Накопление ошибочных данных в таблице диагностических признаков свалок/карьеров является тоже частью методики распознавания.

Острую токсичность отобранных проб воды определяли в соответствии с методическим руководством по биотестированию воды РД 118-02-90. В ходе исследования проявила острую токсичность только проба из р. Назия, пос. Приладожский, где гибель дафний достигала 50%. Разбавление данной пробы стандартной водой в 2 раза переводило её в разряд нетоксичных (гибель тест-объектов снижалась до 10 %). Введение в пробу индикаторных веществ не снижало её токсичность за исключением унитиола, применение которого позволяло снизить гибель дафний с 50 до 0%, что указывает на наличие в исследуемой воде солей тяжелых металлов.

Для создания электронной карты, нанесения векторных слоев и размещения фотоматериалов экспедиционных съемок с квадрокоптера использовалась геопортальная технология *Scanex GeoMixer*. В качестве базовых слоев проекта «*Ladoga*» использовались мозаики космических снимков со спутника *RapidEye* за июль-август 2012 и 2013 года. Исходное изображение с БПЛА подвергалось процессу геопривязки. Результирующий геопривязанный растр в формате *IMG* или *GeoTIFF* размещался в геопортале отдельным слоем данных, также как и полученные фотоматериалы наземной съемки экологически опасных зон водосбора Ладоги.

Созданная по результатам обработки космических и аэроснимков электронная комплексная карта представляет собой фоновую основу для проведения мероприятий дистанционного и экспедиционного мониторинга для прибрежной зоны Ладожского озера в будущем. Такой вид комплексной карты поможет отслеживать изменения экологического состояния водосбора Ладожского озера при наложении и анализе разновременных слоев геопространственной информации.

## Литература:

1. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Чичкова Е.Ф., Уличев В.И. Основы методики контроля над объектами накопленного экологического ущерба. // Перспективные направления развития науки в Петербурге. - СПб.: Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2015. - С. 253-265.

2. Уличев В.И., Чичкова Е.Ф., Дудаков М.О. Методика оценки экологического состояния водосбора Ладожского озера на основе космических съёмок и тестовых наблюдений с помощью беспилотного летательного аппарата // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды Четвёртой Всероссийской конференции с международным участием. - М.: ИВП РАН, 2015. – С. 454-456.

3. Чичкова Е.Ф., Уличев В.И. Мониторинг восточной части Финского залива и его водосбора средствами аэрокосмического зондирования в 2014 году // День Балтийского моря: Материалы XVI международного экологического форума – СПб.: Изд-во Своя книга, 2015. – С.178-180.

4. Уличев В.И., Чичкова Е.Ф., Дудаков М.О. Экологический контроль прибрежной части Ладожского озера на основе космического зондирования Земли и наблюдений с применением беспилотного летательного аппарата // География: Развитие науки и образования: *Коллективная монография* по материалам международной научно-практической конференции LXVIII Герценовские чтения – СПб.: РГПУ им. А.И.Герцена, 2015. – С. 208-212.

## ОБОСТРЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВОДОСБОРЕ И АКВАТОРИИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Владислав Александрович Румянцев,  
академик РАН, д.г.н., научный руководитель  
ИНОЗ РАН,  
E-mail: rum.ran@mail.ru  
Леонид Николаевич Крюков,  
д.х.н., главный научный сотрудник  
ИНОЗ РАН,  
E-mail: kryukovln@yandex.ru

*Аннотация:* Экологическое состояние водосбора и акватории Ладожского озера ухудшается, качество воды падает и растет заболеваемость населения Санкт Петербурга, Карелии и Новгородской области.

*Ключевые слова:* вода, озеро, Ладога, экология, мониторинг, статистика

Широко известно, что на Ладоге со времен последнего оледенения сохранились гляциально-морские реликтовые организмы – представители растительного и животного мира. В озере живет кольчатая нерпа, а до экологической катастрофы 70-80-х годов прошлого века обитал осетр. Озеро является вторым по величине в России после Байкала и крупнейшим пресным водоемом Европы. Стратегическое значение Ладоги состоит в том, что она является источником централизованного питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения Санкт-Петербурга, ряда городов и населенных пунктов Ленинградской области и Республики Карелия. В геополитическом плане Ладожское озеро играет большую роль в формировании состояния Финского залива и оказывает определенное влияние на экосистему Балтийского моря. Кроме того, в условиях постоянного роста дефицита пресной воды в мире Ладожское озеро может рассматриваться как потенциальный резервуар для поставок питьевой воды в остро нуждающиеся регионы России и другие государства [1].

В настоящее время в развитых странах мира произошло смещение акцентов от определения характеристик водной среды в сторону оценки безопасности воды для потребления человеком и для обитания промысловых гидробионтов. В этой связи напомним, что ранее во второй половине прошлого века из-за несоблюдения природоохранного законодательства промышленными, сельскохозяйственными и жилищно-коммунальными предприятиями, судоходными, рыболовецкими и туристическими компаниями природным ресурсам Ладожского озера был нанесен колоссальный ущерб. В результате процессов антропогенного эвтрофирования и загрязнения в Ладоге нарушилась стабильность водной экосистемы, ее способность к самоочищению и произошло резкое ухудшение качества воды. Как следствие в конце 70-х годов по раковым заболеваниям Ленинград вышел на 1 место в СССР среди городов с миллионным населением. В силу 2-х специальных постановлений правительства СССР и существенного экономического спада 90-х годов, сказавшегося на всей хозяйственной деятельности в ладожском бассейне, было зафиксировано оздоровление экологической ситуации и улучшение качества воды Ладоги. Вода озера стала отвечать требованиям, предъявляемым к источнику централизованного питьевого водоснабжения.

Между тем сегодня в многочисленных публикациях СМИ констатируется, что на берегах Ладожского озера происходит вырубка леса и строительство дачных поселков с грубейшими нарушениями Водного кодекса РФ. Контроль над работой свалок, карьеров и очистных сооружений оставляет желать лучшего и практически базируется только на энтузиазме местных жителей. Наряду с высокотехнологичными производствами на территории водосбора Ладоги активировалась деятельность сельскохозяйственных ферм, значительного количества целлюлозно-

бумажных комбинатов, алюминиевых, металлургических и нефтехимических заводов, для которых характерно большое количество опасных выбросов в окружающую среду. Закономерно, что на рубеже 2005-2010 гг. вновь, как и 70-80-е годы прошлого века, был зафиксирован значительный рост заболеваемости населения Санкт-Петербурга, Новгородской области и Карельской республики, табл. 1 и 2 [2]. Нельзя исключать, что постоянное и длительное влияние ладожской воды на жителей территорий водосбора Ладоги является одной из важных причин роста заболеваемости населения и особенно детей СЗФО [3].

Таблица 1

*Сравнение заболеваемости населения по субъектам Российской Федерации за 2000 - 2012 гг.  
(в расчете на 1000 человек)*

Субъект РФ	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Российская Федерация	731	744	780	797	794
Москва	727	680	697	715	699
Центральный ФО	709	695	720	735	732
Северо-Западный ФО	763	759	851	860	860
Санкт-Петербург	694	725	857	879	884

Таблица 2

*Заболеваемость взрослых жителей и детей до 14 лет Санкт-Петербурга, Ленинградской области, республики Карелия и Новгородской области в сравнении с заболеваниями населения Российской Федерации*

Болезни взрослых/детей	Россия	Санкт-Петербург	Ленинградская область	Республика Карелия	Новгородская область
Новообразования	11 / 5	16 / 9	10 / 2	14 / 8	14 / 5
Хромосомные нарушения	2 / 12	2 / 16	1 / 5	4 / 20	3 / 19
Болезни мочеполовой системы	49 / 32	51 / 39	33 / 16	75 / 42	34 / 22
Болезни кожи	48 / 89	57 / 136	34 / 61	67 / 123	58 / 125
Болезни органов пищеварения	33 / 82	23 / 89	22 / 48	46 / 103	53 / 107
Инфекционные и паразитарные болезни	32 / 81	42 / 131	23 / 64	47 / 120	34 / 98

На сегодняшний день можно с грустью констатировать, что состояние Ладоги с каждым годом становится всё хуже и всё тревожнее. Воды Ладожского бассейна постоянно загрязняются. При избытке биогенных веществ в воде и в соответствии с принципом фазовых реакций даже незначительные количества тяжелых металлов, стойких органических загрязнителей и некоторых

лекарственных субстанций инициируют развитие сине-зелёного «цветения» многих водоемов водосбора Ладоги. Более того, в акватории озера начиная с 2004-2005 гг. стали обнаруживать цианотоксины, продуцируемые сине-зелёными водорослями, так называемыми цианобактериями, табл. 3 [4, 5].

Таблица 3

*Характеристика канцерогенности, нейротоксичности и общей токсичности проб воды из Ладожского озера*

Показатели биологической активности	Свирская губа	Волховская губа	Акватория Валаамского архипелага
Наличие микроцистина – LR	+	+/-	0
Наличие микроцистина - VF	+	+/-	0
Ингибирование ацетилхолинэстеразы, %	31	27	0
Цитотоксичность, %	50	50	0

При массовом развитии этих микробиологических объектов или «цветении» нарушается атмосферная аэрация воды, фиксируются заморы рыб и гибель других гидробионтов, появляется неприятный запах и возникает опасная для здоровья человека экологическая ситуация. За счет интенсивного размножения цианобактерий происходит повышение значений водородного показателя воды. В щелочной среде возникают благоприятные условия для развития вирусов полиомиелита, холерного вибриона и размножения других патогенных существ [6].

Сегодня определение токсигенности цианобактерий в основном базируется на методах токсикологии [7], полимеразной цепной реакции [8] и фиксируется другими современными способами [9, 10]. Анализируя перечисленные регламенты определения опасности сине-зелёного «цветения», заметим, что для их методической реализации необходимо наличие импортного оборудования и поставка дорогостоящих зарубежных стандартных образцов токсинов и праймеров, что сегодня имеет определенные ограничения. При этом одним из ключевых этапов системы государственного мониторинга поверхностных вод является отбор, подготовка, хранение и анализ в стационарных условиях проб соответствующих водных сред. Не вызывает сомнений, что для принятия адекватных решений по оздоровлению экологической ситуации необходимо определение качества воды в режиме реального времени непосредственно на водном объекте. В этой связи в ИНОЗ РАН совместно с другими институтами Санкт-Петербурга оцениваются возможности применения, во-первых, данных беспилотных летательных аппаратов и аэрокосмических наблюдений во времени за концентрацией хлорофилла в водоемах с помощью спутникового сканера цвета MODIS-Agua [11] и, во-вторых, новой отечественной мультисенсорной системы «электронный язык» [12]

В настоящее время отпали последние сомнения в том, что векторами переноса вредных веществ в окружающей среде являются наночастицы. Попадая в ткани, клетки и органеллы живых организмов, наночастицы могут играть роль катализаторов образования токсичных соединений, даже если сами они безопасны. Уровень проникновения наночастиц через клетки желудочно-кишечного тракта человека (эффективная площадь 200 м<sup>2</sup>) существенно выше, чем через клетки легких (140 м<sup>2</sup>) и неповрежденную поверхность кожи (1.5-2.0 м<sup>2</sup>). Следовательно, воздействие на организм человека воды, содержащей наночастицы, может приводить к печальным последствиям.

Установлено, что наночастицы образуются при извержении вулканов и лесных пожарах, при эрозии почв и горных пород, при добыче и промышленной переработке сырья, при взмучивании водоемов и в местах тектонических разломов, что свойственно дну Ладожского озера. К настоящему моменту в РФ создана система оценки безопасности и контроля в окружающей среде водных взвесей со структурными элементами размером менее 100 нм [13]. При этом разработано и

принято к исполнению значительное количество методических указаний, реализация которых применительно к конкретным условиям пресноводных объектов является крайне сложной, дорогостоящей и трудно выполнимой задачей. В результате исследований ИНОЗ РАН был разработан новый метод экспресс-анализа наномасштабных частиц, который в настоящее время находится на стадии статистической проверки и верификации [14].

Тем временем уже в настоящий момент стало доказанным фактом, что в воде реки Нева концентрируется большинство загрязнений с водосбора Ладожского, Онежского и Ильмень озёр [15]. На повестке дня остро встали вопросы обеспечения Санкт-Петербурга и Ленинградской области водой из экологически чистых зон акватории Ладожского озера и внедрения эффективных технологий очистки сточных вод и уничтожения отходов. Естественно, что решение перечисленных выше проблем невозможно без принятия соответствующих административных мер по сохранению пресноводных ресурсов Ладожского, Онежского и Ильмень озёр.

#### Литература

1. Румянцев В.А. Ладожское озеро: экологические проблемы, причины, пути решения // Региональная экология. – 2012. - № 1-2 (33). – С. 7-13.
2. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Здравоохранение в России – 2013. Москва. 2013. - Табл. 2.22-2.25, 2.66.
3. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Крюков Л.Н. Влияние золь-гель процессов в бассейне Ладоги на медико-экологическую обстановку на территориях водосбора озера // Вестник Российской академии наук. - 2016. - Т. 86. - № 1. - С. 43-47.
4. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (CYANOBACTERIA, CYANOPHYTA) // Альгология. - 2008. - Т. 18. - № 1. - С. 3-20.
5. Voloshko L., Korcecky J., Safronova T., Pljusich A., Titova N., Hrouzek P., Drabkova V. Toxins and other bioactive compounds produced by cyanobacteria in Lake Ladoga // Estonian Journal of Ecology. - 2008. - V. 57. - № 2. - P. 100-110.
6. Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Рыбакин В.Н. Киселев Е.Ю. Проблема «цветения» сине-зелёных водорослей и пути её решения. Раздел 6.3 в сборнике «Перспективные направления развития науки в Петербурге» / ред. Ж.И.Алферов, О.В.Белый, Г.В.Двас, Е.А.Иванова – СПб: Изд-во ИП Пермяков С.А., 2015. С.277-292.
7. Пряхин Е.А., Тряпицина Г.А., Ячменев В.А., Бурмистрова А.Л., Андреев С.С., Сафонова Е.В., Дерябина Л.В., Коломиец И.А., Чернов К.С. Оценка токсических свойств цианобактерий Шершневского водохранилища Челябинской области // Гигиена и санитария. - 2008. - № 1. - С. 73-75.
8. Тихонова И.В., Белых О.И., Помазкина Г.В., Гладких А.С. Анализ цианобактерий озера Байкал и Усть-Илимского водохранилища на наличие гена синтеза микроцистина // Доклады академии наук. - 2006. - Т. 409. - № 3. - С. 425-427.
9. Степанова Н.Ю., Халиуллина Л.Ю., Никитин О.В., Латыпова В.З. Синезеленые водоросли, цианотоксины, иммуноферментный анализ // Вода: химия и экология. - 2012. - № 11 (53). - С. 67-72.
10. Сиделев С.И., Зубишина А.А., Бабаназарова О.В., Кутузова В.Ю., Мартьянов О.В. Мониторинг содержания цианотоксинов микроцистинов в водоемах Верхней Волги: молекулярно-генетический и аналитический подходы // Вода: химия и экология. - 2014. - № 8 (74). - С. 88-94.
11. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Чичкова Е.Ф., Уличев В.И. Основы методики контроля над объектами накопленного экологического ущерба. Раздел 6.1 в сборнике «Перспективные направления развития науки в Петербурге» / ред. Ж.И.Алферов, О.В.Белый, Г.В.Двас, Е.А.Иванова – СПб: Изд-во ИП Пермяков С.А., 2015. - С.253-265.
12. Kirsanov D., Legin A., Legin E., Zagrebina A., Ignatieva N., Rybakin V. Mimicking daphnia magna bioassay performance by an electronic tongue for urban water quality control // Analytica Chimica Acta. - 2014. - Т. 824. - С. 64-70.

13. Онищенко Г.Г., Тутельян В.А., Гмошинский И.В., Хотимченко С.А. Развитие системы оценки безопасности и контроля наноматериалов и нанотехнологий в Российской Федерации // Гигиена и санитария. - 2013. - № 1. - С. 4-11.

14. Румянцев В.А., Кармазинов Ф.В., Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В. Оценка количества частиц наномасштабного диапазона в водных объектах бассейна Ладожского озера. Раздел 6.2 в сборнике «Перспективные направления развития науки в Петербурге» / ред. Ж.И.Алферов, О.В.Белый, Г.В.Двас, Е.А.Иванова – СПб: Изд-во ИП Пермяков С.А., 2015. С.266-276.

15. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Латыпова В.З., Крюков Л.Н. Экологическое значение золь-гель процессов в пресноводных объектах // Российский журнал прикладной экологии. 2015. № 2. С. 47-53.

## **AGGRAVATION OF THE ECOLOGICAL SITUATION ON THE RESERVOIR AND THE WATER AREA OF LAKE LADOGA**

Vladislav Aleksandrovich Rummyantsev  
is the academician of the Russian Academy of Sciences,  
the doctor of geographical sciences,  
the research supervisor of Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: rum.ran@mail.ru

Leonid Nikolaevich Kryukov  
is the Doctor of Chemistry,  
the chief researcher of Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
E-mail: kryukovln@yandex.ru

*Abstract:* The ecological condition of a reservoir and the water area of Lake Ladoga worsens, quality of water falls and incidence of the population of St. Petersburg, Karelia and the Novgorod region grows.

*Keywords:* water, lake, Ladoga, ecology, monitoring, statistics



---

## СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 551

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Алексей Владиславович Амантов,  
к.г.-м.н., ведущий научный сотрудник  
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский  
геологический институт им. А.П. Карпинского»  
E-mail: [4448470@mail.wplus.net](mailto:4448470@mail.wplus.net)

*Аннотация:* Котловина Ладожского озера приурочена к фрагменту склона Балтийского щита, осложненного рифейской Ладожско-Пашской грабен-синклиналью. Последняя принадлежит к отличному от линейных протяженных авлакогенов семейству рифейских структур, тяготеющему к крупным готским интрузивным массивам. Плитный чехол имеет денудационное выклинивание и залегает моноклинально в соответствии с характером понижения основания – допоздневендского пенеплена к юго-востоку. Малоамплитудные дислокации чехла обычно наследуют выраженные рифейские структурные элементы. Обычны мощные гляциодислокации. Ледниковая и водно-ледниковая денудация послужила определяющим фактором плейстоценового развития разнопорядковых структурно-денудационных форм.

*Ключевые слова:* рифей, эдиакарий, Ладожское озеро, геология, геоморфология, тектоника, неотектоника

Комплексные опытно-методические и геологосъемочные работы ВСЕГЕИ в сотрудничестве с СЗДПР и другими организациями послужили основой изучения геологического строения и тектоники Ладожского озера. Приоритетную роль в расчленении осадочного чехла играло непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) и драгирование. Их дополнили последующие обобщения с применением современных компьютерных технологий и специализированного моделирования.

В ладожском сегменте зоны перехода от Балтийского щита к Русской плите кристаллический фундамент представлен архейскими и раннепротерозойскими (преимущественно свекокарельскими) структурными комплексами, дооформленными в процессе готской активизации массивами рапакиви-габбро-анортозитов. Плитный (ортоплатформенный) чехол начал формироваться с позднего венда. Особенности же котловины Ладожского озера связаны с распространением квазиплатформенных осадочных и вулканогенных комплексов раннерифейского, а также более молодого (предположительно позднерифейско-ранневендского) возраста (Рис.1). Последние условно отнесены к свеконорвежской активизации. Квазиплатформенные комплексы слагают Ладожско-Пашскую грабен-синклиналь (ЛПГ), которая принадлежит к особому семейству рифейских структур, отличному от более молодых линейных протяженных авлакогенов.

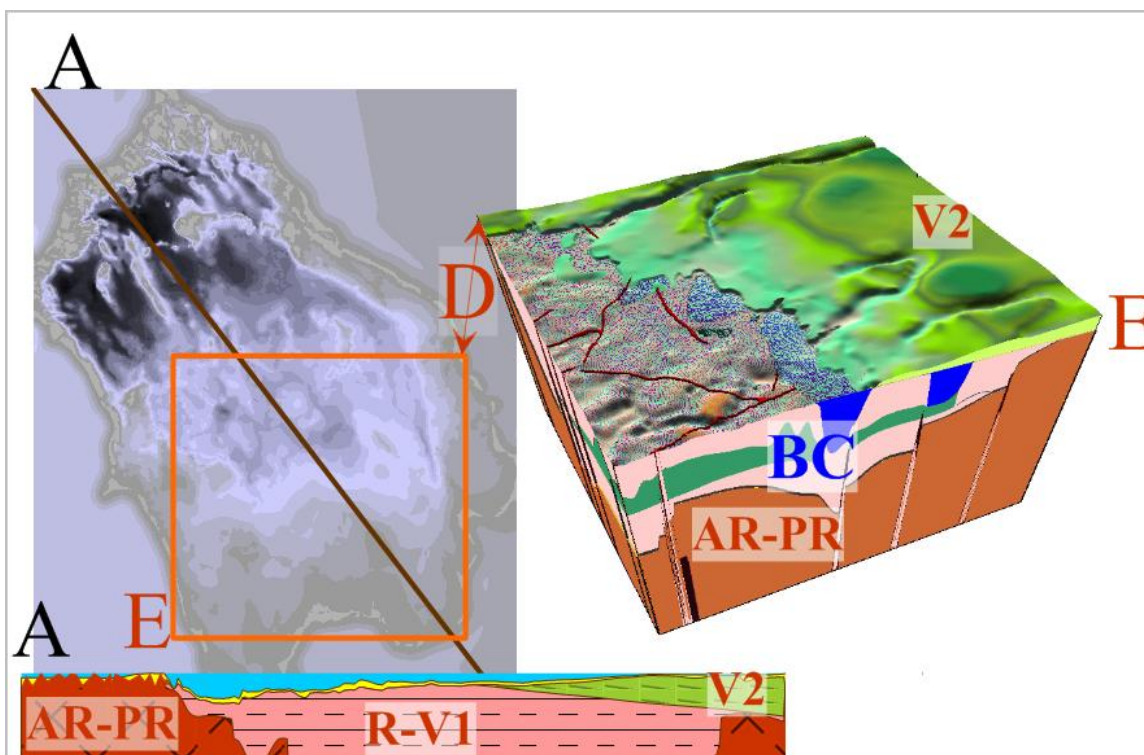


Рис. 1. Ладожское озеро: упрощенные разрез (внизу) и 3D модель (справа) геологического содержания. AR-PR – кристаллический фундамент, R-V1 –рифейские и ранневендские (?) квазиplateформенные комплексы, V2 – поздневендский плитный чехол. BC- Вуоксинская рубцовая синклиналь.

Грабен-синклинали семейства пространственно тяготеют к крупным готским интрузивным массивам. Возраст плутонов на побережье определен в 1547 – 1530 млн. лет [13]. Помимо механизма “кальдерных погружений” [11], в формировании специфичного структурного плана значимым представляется плотность магмы и форма внедрения, скорость остывания, асимметрия последующего раннерифейского эрозионного среза и сопутствующее последнему изостатическое поднятие. Общий структурный ансамбль в пределах Ладожского озера на готском этапе осложняет зона близширотного ангулярного растяжения (при возможной сдвиговой компоненте), которая маркируется предполагаемым Ладожским массивом рапакиви - габбро-анортозитов, слившимся с Салминским [2]. Подобные ЛПГ структуры не являются типичными лишь для описываемого сегмента окраины Балтийского щита, хотя их сохранность зависит от эрозионного среза. Например, одновозрастная синформа Даларна в Швеции, ожидаемо имеет общие до деталей черты не только рифейского развития и возраста магматизма, но и современного рельефа (рис. 2), поскольку на сходные по физическим свойствам контрастные комплексы воздействовали тождественные процессы кайнозойской денудации и последующего ледникового выпаживания.

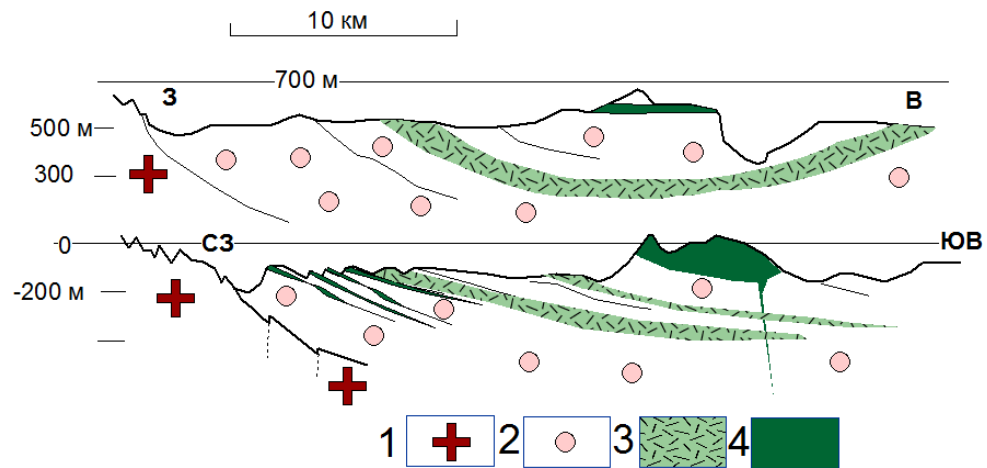


Рис. 2. Принципиальные упрощенные разрезы структур Даларны (вверху, по Ala Adin Al Daħan [9]) и Ладожско-Пашской. 1 – фундамент, 2–4 – раннерифейский комплекс (2 – осадочные породы, преимущественно песчаники, 3 – преимущественно базальтовые лавы, 4 – дайки, силлы долеритов, габбро-сиенитов).

Раннерифейские осадочные и, по крайней мере, двухфазные магматические образования [1,2,6,12,13,14,15] ЛПГ доминируют на дочетвертичном срезе в северной части Ладожского озера [1,2,4], где более молодые несогласно залегающие позднерифейско-ранневендские комплексы сохранились лишь фрагментарно в осевых частях отрицательных структур, севернее о-ва Коневец и западнее о-ва Валаам. Они шире распространены южнее Коневецкого порога, например, в пределах Вуоксинской рубцовой синклинали простираения 100-110°, смыкающейся с северо-западным Пашским грабеном [1, 2]. Характерны простые пологие складки с углами падения до 10°, хотя данные НСП изредка фиксируют зоны сложных деформаций, связанных с внедрением некоторых интрузивных тел.

Плитный чехол, представленный преимущественно отложениями позднего венда [2,4], был сейсмостратиграфически расчленен детальнее по сравнению с прилегающей сушей и коррелирован с разрезами скважин побережья. Для него характерно спокойное пологое моноклинальное залегание с падением на юго-восток (рис. 3, 4). Отдельные нарушения находят отражение в плитном чехле [2,3], обычно наследуя выраженные рифейские структурные элементы, такие как Вуоксинская рубцовая синклираль и Пашский грабен. Локальная отрицательная структура, сложенная венд-ордовикскими породами, гипотетически может присутствовать северо-западнее о-ва Лембач Валаамской гряды.

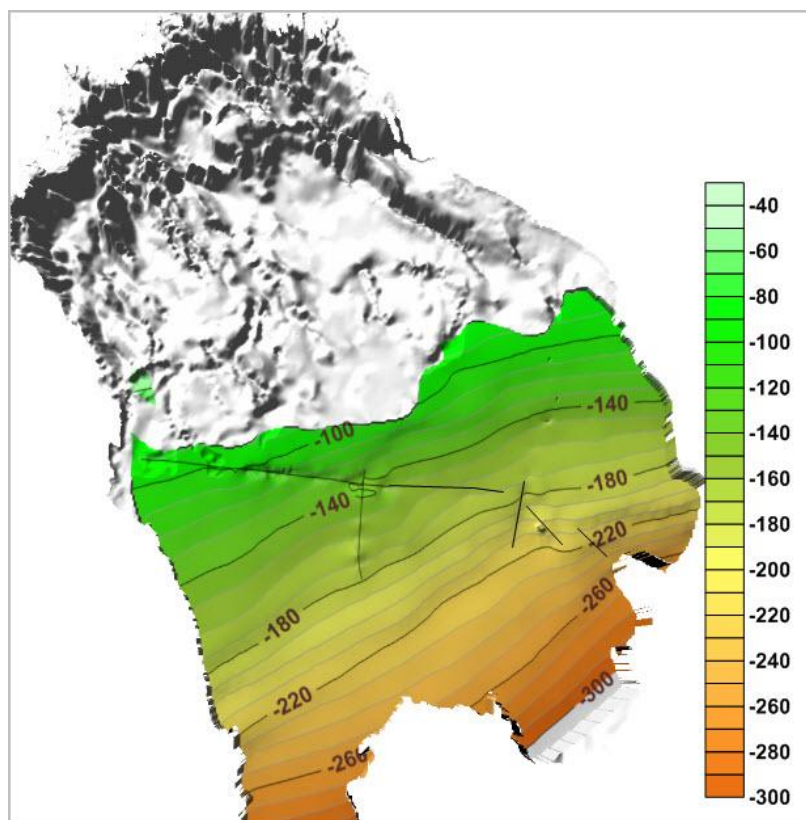
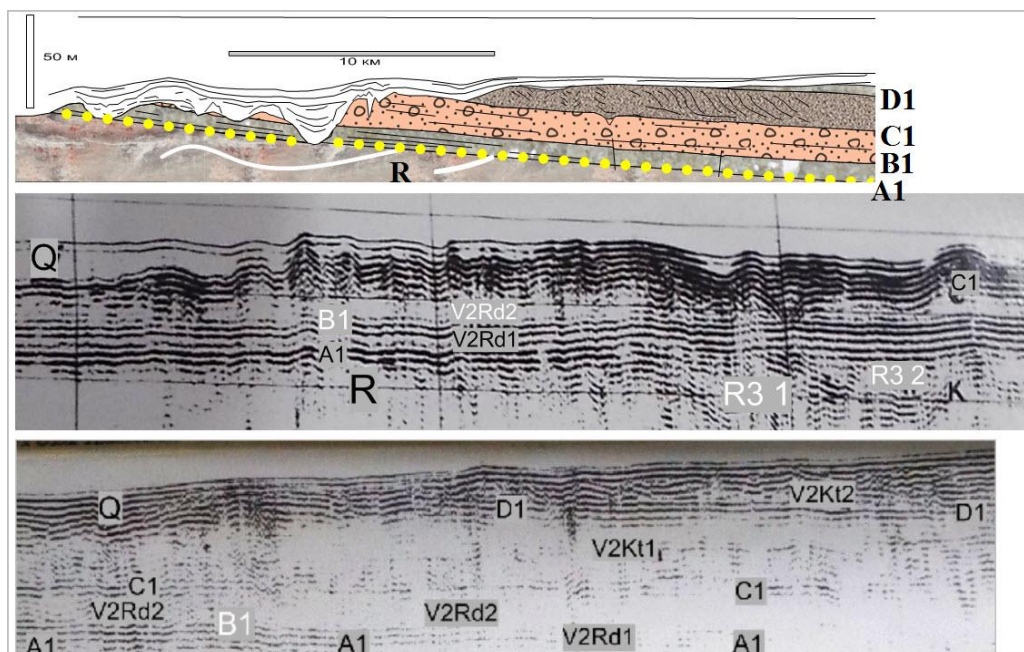


Рис. 3. Рельеф подошвы плитного чехла в метрах (горизонт А1).

Базальная старорусская свита редкинского горизонта разделяется на нижнюю и верхнюю части (рис. 4). Мощность нижнего подразделения слабо увеличивается в северо-восточном направлении. Оно представлено песчано-глинистыми породами, причем роль аргиллитоподобных разностей также возрастает к северо-востоку. По аналогии с сушей присутствуют диамиктиты. Между редкинским и котлинским горизонтами, который сеймостратиграфически легко разделяется не менее чем на три подразделения, фиксируется перерыв с изменением плана бассейнов. В нижней части котлинского разреза, по крайней мере, на востоке озера наблюдаются проградационные клиноформы (тела бокового наращивания), возможно отвечающие песчано-алевролитовым фациям авандельты. Песчаники, алевролиты и глины ровенского горизонта (относимого либо к верхнему венду, либо к нижнему кембрию) развиты локально на мелководьях вблизи южного побережья озера. Плитный чехол имеет отчетливое денудационное сокращение мощности, а по периферии сохраняются множественные останцы выклинивающихся подразделений (рис. 4). Выходам тех или иных разностей свойственна различная проявленность в литоморфном рельефе коренных пород. Более устойчивые к денудации слои верхней части редкинского горизонта и аргиллитов василеостровской свиты котлинского горизонта выражены выположенными “уступами” (несколько более крутыми склонами). Типичны мощные гляциодислокации, в которые иногда вовлечено более 10 м вендских отложений, особенно в случае доминирования на дочетвертичном срезе глинистых разностей.





*Рис. 4. Интерпретация типового разреза по данным НСП, иллюстрирующая выклинивание поздневендского плитного чехла и примеры волновой картины. Основные отражающие горизонты: А1 – допоздневендское основание, В1 – кровля базальной части редкинского горизонта, С1 – подошва гдовских слоев котлинского горизонта, D1 – подошва василеостровской свиты котлинского горизонта. R – рифейские образования, Q - четвертичные отложения.*

Контрастный рельеф северной части котловины Ладожского озера нередко связывают с проявлениями масштабной блоковой неотектонической активности [7]. Однако, механизм образования котловины Ладожского озера связан с избирательной денудацией в геоморфологически predetermined zone изменения ледникового воздействия [10]. Он типичен для окраин Балтийского и Канадского щитов, подвергавшихся многократным плейстоценовым оледенениям. Северная переуглубленная часть котловины рассматривается как самый крупный в мире ледниковый цирк [3]. В рельефе дочетвертичных образований он получил наиболее четкое оформление к концу наиболее мощного и продолжительного днепровского оледенения, как и большинство наиболее глубоких и протяженных туннельных долин. Многие из них выражены в современном рельефе.

Ледниковая и водно-ледниковая денудация послужила определяющим фактором плейстоценового развития разно порядковых структурно-денудационных форм.

Распределение плейстоценовых отложений сложное, но прогнозируемое моделированием. Некоторая специфика связана с изменением роли и тенденции ледниковой денудации во времени, а также возможным локальным воздействием контурных придонных течений, следующих вдоль изобат в зонах контрастного рельефа, отражающего выходы более прочных рифейских магматических образований на севере котловины [3]. Распространение релевантных окаймляющих ложбин транзита в пространстве объяснимо оценочной моделью контуритовой седиментации. Влияние придонных течений во времени могло изменяться в сторону усиления по сравнению с современным, особенно в случаях проникновения соленых вод после деградации предшествующих оледенений.

Реликтовые плейстоценовые отложения, включая межледниковые, сохранились в ряде как отрицательных форм (туннельных долинах и ложбинах), так и положительных. Последние доминируют в районе хвостатых скал Западного Архипелага [1,2,3].

Компоненты послеледниковых изостатических движений рассматриваются с позиций физического моделирования, учитывающего не только ледниковую компоненту, но и перераспределение водных масс и осадочного материала [5]. Для проверки параметров изгибной

жесткости литосферы и понимания влияния тектонического фактора для северо-запада Русской плиты был применен независимый метод моделирования изостатической деформации допоздневендского пенеппена под нагрузкой осадочных комплексов. Неотектонические движения не сводятся исключительно к изостазии [4,8]. Однако, ряд видимых деформаций голоценовых осадков в зонах контрастного рельефа (например, в зоне бронированных более прочными магматическими породами четырех параллельных куэстообразных уступов вблизи северного побережья Ладоги) имеет бескорневой характер и связан, в том числе, с дифференцированным уплотнением подстилающих четвертичных отложений и иными причинами.

#### Литература:

1. Амантов А. В. Этапы геологического развития Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / РАН, РГО. – СПб. – 1993. – С. 5–13.
2. Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Регион. Геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 22–32.
3. Амантов А. В., Амантова М. Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Регион. геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 5–14.
4. Амантов А. В., Спиридонов М. А. Геология Ладожского озера // Сов. геология. – 1989. – № 4. – С. 83–89.
5. Амантов А.В., Амантова М. Г., Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю., Гусенцова Т. М., Жамойда В. А., Фьелдскар В. Проблемы голоценового развития Южного Приладожья // Регион. геология и металлогения. – 2016. – № 65. – С. 37–49.
6. Богданов Ю. Б., Саватенков В. В., Иванников В. В., Франк-Каменецкий Д. А. Изотопный возраст вулканитов салминской свиты рифея // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: Материалы I Рос. конф. по изотопной геохронологии. Санкт-Петербург, 25–27 ноября 2003 г. – СПб.: Центр информ. Культуры. – 2003. – С. 71–72.
7. Ладожское озеро / под ред. Г. С. Биске. – Петрозаводск. – 1978. – 203 С.
8. Никонов А. А., Энман С. В., Флейфель Л. Д. Голоценовые и современные движения земной коры в переходной зоне от Фенноскандинавского щита к Восточно-Европейской платформе в районе Ладожского грабена // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Материалы XIV Междунар. конф. 2-я часть. – Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2008. – С. 79–80.
9. Ala Adin Al Dahan. Mineral Diagenesis and Petrology of the Dala Sandstone, Central Sweden // Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala, N.S. – 1985. – Vol. 12. – 48 p.
10. Amantov A. Plio-Pleistocene Erosion of Fennoscandia and its Implication for the Baltic Area // Prace Panstw. Inst. Geol. CXLIX. Warsaw. – 1995. – P. 47–56.
11. Amantov A., Sederberg P., Hagenfeldt S. The Mesoproterozoic to Lower Palaeozoic sedimentary bedrock sequence in the Northern Baltic Proper, Aland Sea, Gulf of Finland and Lake Ladoga // Prace Panstw. Inst. Geol. CXLIX, Warsaw. – 1995. – P. 19–25.
12. Amantov A, Laitakari I, Poroshin Ye. Jotnian and Postjotnian: sandstones and diabases in the surroundings of the Gulf of Finland // Geol. Survey of Finland, Spec. Pap. 21. – 1996. – P. 99–113.
13. Amelin Y. V., Larin A. M., Tucker R. D. Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1997. – Vol. 127. – Issue 4. – P. 353–368.
14. Kuptsova A. V., Khudoley A. K., Davis W. et al. Age and provenances of sandstones from the Riphean Priozersk and Salmi formations in the eastern Pasha-Ladoga basin (southern margin of the Baltic Shield) // Stratigraphy and Geol. Correlation. – 2011. – 19(2). – P. 125–140.
15. Lubnina N., Mertanen S., Soderlund U. et al. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambrian Research. – 2010. 183–3. – P. 442–462.

## GEOLOGICAL-GEOMORPHOLOGICAL PECULIARITIES OF THE LAKE LADOGA

Aleksey Vladislavovich Amantov,  
Ph. D, leading scientist

A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI),

E-mail: [4448470@mail.wplus.net](mailto:4448470@mail.wplus.net)

*Abstract:* Lake Ladoga's basin was formed within the fragment of the slope of the Baltic Shield, complicated by the Riphean (Jotnian) Ladoga-Pasha graben-syncline. It belongs to the family of Jotnian structures spatially located around large Gothian intrusive bodies in contrast with linear extended aulacogens. Platform strata thin out with erosional truncation. They dip southeast, defining the monocline that reflects the subsiding of the epi-Late Vendian peneplain. Low-amplitude tectonic dislocations of the cover usually inherit the most pronounced Jotnian structural elements. Disturbance of subjacent strata by glacial action is common. Glacial and fluvio glacial erosion was a dominate factor in the Pleistocene shaping of structural-denudational geomorphological elements of different order.

*Keywords:* Riphean, Ediacaran, Lake Ladoga, geology, geomorphology, tectonics, neotectonics

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HTS ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОБИОНТОВ

Наталия Вадимовна Анненкова  
к.б.н., старший научный сотрудник  
ФГБУН Лимнологический институт СО РАН  
e-mail: tasha.annenkova@gmail.com

*Аннотация:* Современные молекулярно-биологические методы всё чаще применяются в классической гидробиологии. Одним из таких методов является расшифровка молекул ДНК с помощью технологии массового параллельного секвенирования (HTS). Перспективными областями применения данной технологии являются идентификация и мониторинг сообществ микроорганизмов, и исследование молекулярно-генетических механизмов, ответственных за реагирование тех или иных гидробионтов на изменения среды. Нами начаты работы по этим направлениям в рамках изучения озера Байкал. В ходе анализа байкальского пико-нанопланктона выявлены ранее не описанные в озере простейшие (в т.ч. паразитические), ряд которых, по-видимому, эндемичен. Также исследуются видообразование и изменения генной экспрессии в условиях различной солёности у близкородственных простейших (динофлагеллят), обитающих в морской и пресной воде. Хотя на сегодняшний день по-прежнему существует ряд методических сложностей, HTS оказывает всё большее влияние на биологические работы и в ближайшем будущем, по-видимому, станет обязательным для целого ряда исследований.

*Ключевые слова:* массовое параллельное секвенирование, метабаркодинг, транскриптом, планктон, простейшие, динофлагелляты

Относительное удешевление методов молекулярной биологии, произошедшее в последние десятилетия, позволяет использовать их не только в околomedических, но и в классических гидробиологических работах. Одним из этих методов является технология массового параллельного секвенирования ДНК (HTS — High-Throughput Sequencing), которая позволяет расшифровывать миллионы фрагментов ДНК в кратчайшие сроки [1]. Благодаря такому подходу стало возможным не искать единичные фрагменты ДНК с помощью прицельных, трудоемких методов, а идентифицировать практически весь набор ДНК в образце и далее подвергать анализу полученный массив данных (это тем более важно, так как при поисковых работах неизвестно, что именно исследователи хотят найти до того, как оно найдется). Использование HTS на сегодняшний день должно играть важную роль в таких направлениях, как 1) мониторинг гидробионтов, в особенности, одноклеточных форм, 2) изучение того, как влияют изменения факторов среды на модельные системы организмов.

Изучение разнообразия и структуры сообществ гидробионтов необходимо как с точки зрения фундаментальной науки, так и для охраны водоёма. При рутинном мониторинге водных проб с использованием оптической микроскопии удастся достаточно точно охарактеризовать крупные планктонные организмы, в тоже время различные одноклеточные организмы (простейшие и бактерии) в силу своих малых размеров, плохой сохранности в фиксаторах, отсутствию выраженных морфологических признаков часто остаются незамеченными, хотя при этом, именно они могут существенно влиять на всю экосистему. К таким организмам относятся фотосинтезирующие микроводоросли и хищники, паразиты и симбионты. Их роль в биологической цепочке очень велика, в то время как изученность разнообразия, наоборот, мала. Альтернативным методом для их идентификации является так называемый метабаркодинг (или штрихкодирование). Он основывается на выделении генетического материала напрямую из пробы воды с последующей расшифровкой маркерного фрагмента ДНК, заведомо различающегося у разных организмов [2]. В первой декаде 21 века для такой расшифровки использовали молекулярное клонирование с последующим секвенированием по Сэнгеру, сейчас же всё больше



работ осуществляется с помощью HTS. С помощью баркодинга можно быстро и эффективно описать сообщество организмов в пробе, взятой непосредственно из окружающей среды, не привлекая узких специалистов по различным группам организмов. Таким образом, данный метод открывает широкие перспективы для экологических исследований: можно идентифицировать группы таксонов и из водной толщи, и из бентоса, и даже выявить по ДНК древние организмы в осадках. Например, целый ряд генетических исследований показал, что разнообразие планктонных организмов гораздо выше выявленного ранее с помощью традиционных методов микроскопии. Применение HTS позволяет обнаружить и оценить происходящие изменения в структуре редко встречаемых видов, сопутствующих тем или иным основным доминантам, а также среди представителей нано и пикопланктона, сведения о которых часто отсутствуют в классических планктонных списках.

В рамках нескольких комплексных экспедиций (TARA, Malaspina), а также ряда более локальных экспедиций, был проведен баркодинг океанического планктона. Полученные данные перевернули наши представления о его структуре. Например, оказалось, что в мировом океане в большом количестве и разнообразии распространены диплономиды — плохо исследованная группа гетеротрофных жгутиковых простейших, роль этой группы в океане не ясна и ранее к ней относили лишь несколько видов [3]. Изучение пресноводных систем было начато позже и на данный момент опубликовано ограниченное число работ по генетическому анализу пресноводных одноклеточных эукариот. Но и они уже продемонстрировали низкую изученность данных систем. Так же как и для океанических, для пресноводных систем показана важная роль разнообразных паразитических видов, по-видимому, регулирующих численность более крупных представителей планктона [4]. Ряд таксонов, известных только для морей, с помощью HTS были найдены и в пресной воде [например, 5].

В этой связи крайне интересными объектами являются крупные озёрные системы, так как они сочетают в себе некоторые морские характеристики (например, стабильность условий), но при этом пресноводны и изолированы. Одно из них - озеро Байкал, самое древнее (более 26 млн. лет) и самое глубокое (1637 метров) пресное озеро. Из-за столь длительной истории своего существования оно содержит большое количество живых организмов с различной эволюционной историей. Так, часть из них являются древними видами, а часть — возникли недавно за счет механизма взрывного видообразования. В Байкале обитают как уникальные, адаптированные к данному озеру организмы, так и представители космополитных палеоарктических видов. Как и во многих других водоемах, в нем в большей степени изучены многоклеточные, а не одноклеточные эукариоты. В ЛИН СО РАН начаты исследования последних с помощью HTS, в частности, нами получены данные по мельчайшим представителям планктона. Для этого мы использовали фрагмент гена 18S рНК, так как на сегодняшний день это наиболее изученный ген, по нему существуют выверенные базы данных (например, SILVA), включающие большое количество морских и пресноводных видов. Согласно нашим данным многие одноклеточные эукариоты в Байкале не учтены, в том числе это касается существенной части паразитических форм, принадлежащих различным группам (хитридиевые, перкинсииды, апикомплексы и др.). Также найдены ранее не описанные в этом озере свободноживущие группы (например, телонемиды). Показано, что структура сообществ, взятых в разных участках озера с 50 метров (слой, следующий за примерной границей фотосинтезирующей зоны) сходна между собой и отличается от соответствующих сообществ с приповерхностных слоёв.

Байкал содержит около 20% мирового запаса незамерзшей поверхностной пресной воды. При этом, до сих пор вода остается весьма высокого качества, не смотря на процессы локальной эвтрофикации, возникшие в последние годы [6]. Необходима глубокая и детальная мониторинговая программа для озера, чтобы выявлять изменения в его микробиоте в условиях изменяющегося климата. HTS с последующим автоматизированным биоинформатическим анализом в будущем могло бы быть использовано при таком мониторинге для анализа изменений в микробной части планктона и бентоса.

Вторым интересным приложением технологии HTS, как уже было сказано, является изучение с её помощью модельных систем гидробионтов. Это дает возможность более глубокого

осмысления происходящих процессов, позволяет связать экологию и эволюцию, найти молекулярно-биологические причины адаптаций и взаимосвязей, существующих в озерных экосистемах. Например, за счет данной технологии возможна расшифровка транскриптомных данных (транскриптом — совокупность транскриптов, синтезирующихся с активных в данный момент генов). Такой анализ достаточно финансово затратный, но приносит большое количество новой информации и может дать сильный толчок для дальнейшей более детализированной работы. Сравнительный анализ транскриптомов позволяет выявлять комплекс изменений, происходящий на уровне геной регуляции, у организмов под действием тех или иных факторов. Таким фактором может быть изменение физического параметра (температуры, освещённости), влияние тех или иных веществ (солей тяжелых металлов, моющих средств) или же воздействие биологического объекта (например, токсичных цианобактерий). Таким образом, традиционные эколого-токсикологические работы на сегодняшний день получают возможность выйти на принципиально новый уровень.

Одной из важных характеристик водных объектов является их соленость. Вопрос миграций организмов по границе море/пресноводный водоем активно исследуется в фундаментальной биологии. Понимание этого процесса важно и на фоне возможного засоления пресноводных водоемов. Преодоление солевого барьера играет важную роль в видообразовании: даже для большинства одноклеточных организмов оно трудно преодолимо [7]. Почему так происходит и какие факторы (или их комплекс) играют более важную роль — на данный момент неясно. Существуют работы, где классическими методами (подсчет скоростей роста, определение уровня оксидантов в клетке) измеряют толерантность одноклеточных организмов из морей или солоноватых вод к разному уровню солёности [например, 8]. Такие исследования имеют практический смысл, например, в случае токсичных микроводорослей. Они позволяют понять на какие расстояния, в какие водоемы могут попасть токсины. Использование комплексных методов, в т.ч. на основе HTS, необходимо, чтобы выявить генетические механизмы солевой толерантности (или ее отсутствия) у одноклеточных. Какие гены при этом включаются, выключаются? Насколько велик стресс для организма и как он с ним борется? Мы исследуем данные вопросы на модели близкородственных динофлагеллят (группа водных простейших), имеющих разную толерантность к солености: одни из них обитают в океанах, другие в озерах, в том числе в Байкале. При анализе транскриптомов трёх недавно разошедшихся линий панцирных динофлагеллят нами было показано чёткое эволюционное отличие пресноводной линии от двух других, обитающих, в солоноватых водах, но в разных полушариях. Таким образом, фактор среды сыграл более важную роль по сравнению с географическим фактором в эволюции данных линий. Из-за весьма недавнего расхождения исследуемых динофлагеллят часть их генов (включая такие традиционные ДНК маркеры как второй, не транслируемый спейсер (ITS-2) и ген 28S РНК [9]) демонстрировала другую эволюционную историю и только комплексное исследование транскриптомных данных (792 гена в окончательном анализе) позволило установить ключевой эволюционный тренд. Кроме этого нами показано, что пресноводная линия не в состоянии активизировать целый ряд генов, продукты которых, по-видимому, помогают выживанию при изменении солености среды. Напротив, две линии из солоноватых вод примерно одинаково развивались в пресной и морской воде, активизируя при этом разные генные системы.

Молекулярно-генетические методы вот уже несколько десятилетий используются в мировой гидробиологической практике для решения вопросов фундаментальной биологии, особенно в области биогеографии и исследований токсичных воздействий. Всё больше они применяются и для экологического мониторинга. Современная технология расшифровки ДНК позволяет за короткое время получить информацию о миллионах фрагментах нуклеиновых кислот из разных образцов. В тоже время у такого подхода существуют свои ограничения и особенности. Получаемые на данный момент данные требуют тщательной обработки с помощью биоинформатических методов, которые до сих пор недостаточно стандартизированы и их применение требует специальной квалификации. Важнейшим этапом при обработке данных является фильтрация ошибок при расшифровке ДНК. Особенностью работ с использованием HTS часто является необходимость коопераций разных коллективов, в т.ч. это позволяет за один запуск

прибора расшифровать образцы из нескольких проектов, что делает процесс менее финансово затратным для каждого участника.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-04-01704 и программы Российской Академии Наук № 0345–2014–0003. Автор выражает благодарность К. Ренгефорс и Д. Арену (Университет Лунда), а также Р. Логаресу за помощь в исследованиях.

#### Литература:

1. Ekblom R., Galindo J. Applications of next generation sequencing in molecular ecology of non-model organisms. *Heredity*. – 2011. – V.107. – 1–15.
2. Taberlet P., Coissac E., Pompanon F., Brochmann C., Willerslev E. Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding. *Molecular Ecology*. – 2012. – V.21. – 2045–2050.
3. Lukeš J., Flegontova O., Horák A. Diplonemids. *Current Biology*. – 2015. – V.25(16). – R702–R704.
4. Cécile Lepère C., Domaizon I., Debroas D. Unexpected importance of potential parasites in the composition of the freshwater small-eukaryote community. – 2008. – V.74 (10). – 2940–2949.
5. Simon, M., Jardillier, L., Deschamps, P., Moreira, D., Restoux, G., Bertolino, P., López-García, P. Complex communities of small protists and unexpected occurrence of typical marine lineages in shallow freshwater systems. *Environmental Microbiology*. – 2015. – V.17. – 3610–3627.
6. Timoshkin, O. A., D. P. Samsonov, M. Yamamuro, Marianne V. Moore, O. I. Belykh, V. V. Malnik, M. V. Sakirko et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research*. – 2016. – V.42(3). – 487–497.
7. Logares, R., Bråte J., Bertilsson S., Clasen L. L., Shalchian-Tabrizi K., Rengefors K. Infrequent marine-freshwater transitions in the microbial world. *Trends of Microbiology*. – 2009. – V.17. – 414–422.
8. Jahnke L. S., White A. L. Long-term hyposaline and hypersaline stresses produce distinct antioxidant responses in the marine alga *Dunaliella tertiolecta*. *Journal of Plant Physiology*. – 2003. – V.160(10) – 1193–1202
9. Annenkova N. V., Hansen G., Moestrup Ø., Rengefors K. Recent radiation in a marine and freshwater dinoflagellate species flock. *ISME Journal*. – 2015. – V.9(8) – 1821–1834.

## USING HTS TECHNOLOGY FOR MONITORING AND INVESTIGATIONS OF HYDROBIONTS

Natalija Vadimovna Annenkova,  
PhD, Senior Researcher,  
Limnological Institute SB RAS,  
E-mail: tasha.annenkova@gmail.com

*Abstract:* Molecular-biological methods become more and more useful for the classical hydrobiological studies in recent years. High Throughput Sequencing (HTS), which allows to sequence high amount of the DNA, is one of such prominent method. In particular, it can be used for the identification and monitoring of microorganism's communities and for the studies of molecular-genetic responses of the organisms in different environmental changes. We start to work on both of these trends in our investigation of protists from the Lake Baikal. We found various protists from piko-nanoplankton (in particular parasitic ones), which were not previously described in Baikal. Moreover some of them seems to be endemic. Another study is about evolution and different gene expression in protists (dinoflagellates) which are evolutionary very close to each other but have different salinity tolerance. Though there are still some methodological problems, HTS becomes highly important for biological works and soon will be even necessary for certain of them.

*Key words:* High Throughput Sequencing, metabarcoding, transcriptome, plankton, protists, dinoflagellates

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ РЕЛЬЕФА ДНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Владимир Михайлович Анохин  
д.г.н., ведущий научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

[vladanokhin@yandex.ru](mailto:vladanokhin@yandex.ru)

Михаил Арсеньевич Науменко  
д.г.н., заведующий Лабораторией гидрологии  
ИНОЗ РАН

[m.a.naumenko@mail.ru](mailto:m.a.naumenko@mail.ru)

Николай Аркадьевич Нестеров  
д.т.н., заведующий Лабораторией географии и природопользования  
ИНОЗ РАН

[NNesterovmail@yandex.ru](mailto:NNesterovmail@yandex.ru)

*Аннотация:* Проведены исследование закономерностей направлений протяженных форм рельефа (линеamentный анализ) дна Ладожского озера на основе цифровой батиметрической модели. Выяснено, что общие направления форм рельефа одинаковы для всего дна озера. Отмечается преобладание следующих систем направлений: 140°, 0°, 90°, 40°, что, в общем, соответствуют направлениям сети планетарной трещиноватости Земли. Выделенная на дне озера сеть линеamentов совпадает с известными дизъюнктивами, и, следовательно, сеть разломов предположительно может быть прослежена вдоль линий линеamentной сети.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, дно, рельеф, направление, линеament, разлом.

Ладожское озеро, будучи крупнейшим пресноводным водоемом Европы, является главным источником пресной воды для обширного региона, включающего Санкт-Петербург. В то же время это и уникальный природный объект, содержащий серьезные потенциальные возможности развития региона.

Актуальность изучения геологических особенностей дна Ладожского озера очевидна, учитывая, что тектоническое строение, сеть разрывных нарушений дна Ладоги известны лишь схематично; сейсмическая опасность не учитывается должным образом, поступающие по разломам в воду глубинные эманации почти не изучены. Изучением рельефа дна Ладожского озера в разное время занимался ряд организаций - Севзапгеология, ВСЕГЕИ, ВНИИ Океангеология, ИНОЗ РАН [2,7,8] и другие, однако дно Ладожского озера изучено все еще недостаточно.

Появление компьютерных технологий инициировало разработку новых методических подходов, позволяющих по-иному взглянуть на геоморфологическое и тектоническое строение дна озера. Первая цифровая батиметрическая модель Ладожского озера с пространственным разрешением 0.6\*0.6 км была построена в 1993 году и представлена на Первом Международном Симпозиуме по Ладожскому озеру [12]. Обширный объем информации, накопленный в Институте озероведения РАН с тех пор, позволил создать цифровую батиметрическую модель с пространственным разрешением 500 м. На её основе можно корректировать первичные морфометрические характеристики озера, составлять батиметрические карты в широком диапазоне сечений изобат [9,10]. Авторы полагают данную модель рельефа наиболее полно обоснованной фактическим материалом из всех существующих.

На основе этой модели было проведено исследование закономерностей направлений протяженных форм рельефа дна Ладожского озера.

Дно Ладожского озера можно разделить на две геоморфологические зоны – северо-западную и юго-восточную. Северо-западная зона расположена в пределах Балтийского кристаллического

щита, ее рельеф обусловлен тектоническими особенностями строения его юго-восточной окраины, сложенной в основном кристаллическими породами архейско-протерозойского возраста, а также терригенными и эффузивными породами рифея. Толща кристаллического щита разбита многочисленными разрывными нарушениями. Рельеф дна в основном грядовый. Протяженные гряды имеют относительную высоту до 100-150 м, длину до 5-10 км, ширину по основанию до 1-5 км. Гряды возвышаются над всхолмленной поверхностью с высотами вытянутых холмов до 20-50 м, имеющих общий наклон на северо-запад. Перепады глубин колеблются от 5 метров в понижениях между грядами до 30-50 и более метров на километр на склонах гряд (рис.1.).

Примерно от широты Приозерска на юго-восток склон кристаллического щита все более перекрывается четвертичными озерными, озерно-ледниковыми и прочими отложениями. Южнее широты о. Коневец по всей ширине дна озера кристаллические породы щита перекрываются вендско-фанерозойскими отложениями плитного комплекса. Далее простирается юго-восточная зона сглаженного рельефа, распространенного на все более мощном осадочном чехле вендско-фанерозойских отложений Русской платформы. Расчлененность рельефа в юго-восточной зоне крайне низкая, перепады глубин составляют 1-3 м на км. Дно здесь так же, как и в северо-западной зоне, имеет слабый наклон на северо-запад (рис. 1).

Деление дна озера на две зоны обосновывается, в частности, применением к модели рельефа двумерной пространственной автокорреляционной функции [9]. В результате выявленные радиусы корреляции для распределения глубин и уклонов в юго-восточной части озера оказались примерно в два раза больше, чем в северо-западной части, что указывает на принципиальное различие в размерностях форм рельефа в этих двух зонах. Имеющиеся варианты более дробного геоморфологического районирования котловины Ладожского озера [8] в данной работе не использовались.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) дна Ладожского озера позволяет провести линеаментный анализ рельефа дна Ладожского озера по методике, применявшейся авторами ранее [3,5], с довольно высоким качеством. Эта методика сводится к выделению первичных линий по осям протяженных элементов рельефа (в данном случае – по осям гряд, холмов, долин) с последующим объединением первичных линий в более крупные протяженные линеаменты. Выделение производится в векторной программной среде MapInfo с привязкой к системе координат СК-42. Затем данные переводились в среду ArcView, в которой строились розы-диаграммы.

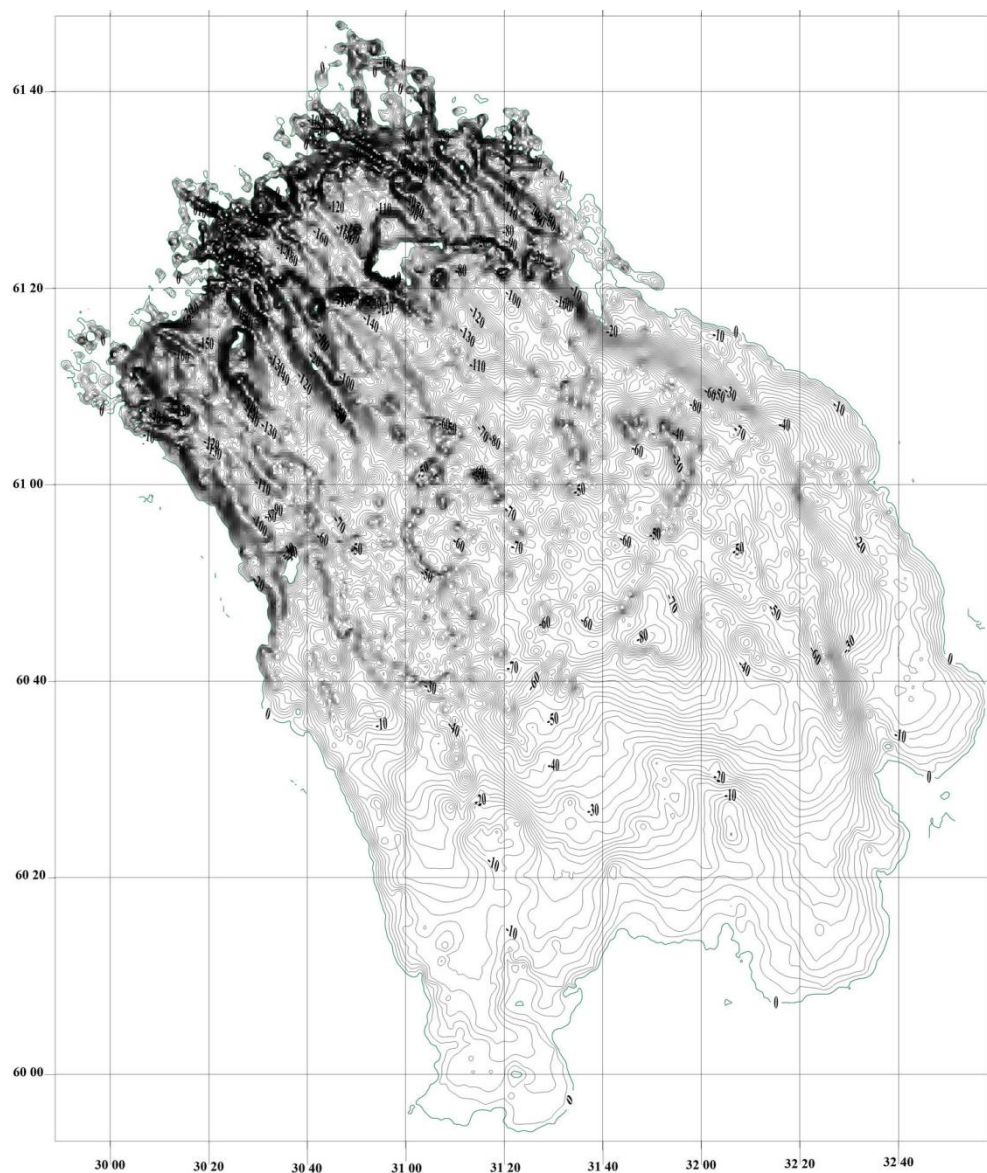
При любых действиях с изобатами следует учитывать, что проведение изобат «является в известном смысле гипотетическим, поскольку зависит от гипотезы, что значения параметра в промежутках между точками измерений соответствуют той или иной интерполяционной формуле» [11]. Для уменьшения этого элемента гипотетичности и повышения достоверности изображения изобат при построении использовались все существующие данные о глубинах по району съёмки.

Проблема выбора оптимального шага изобат решалась, в частности, привлечением таких статистических показателей рельефа дна, как показатели вертикальной ( $\sigma_z$ ) и горизонтальной ( $\sigma_r$ ) расчленённости поля рельефа дна [11].

Для юго-восточной, зоны, где дно имеет сглаженный рельеф, оптимальным признан шаг сечения изобат 1-2 м. Такой шаг даёт возможность выявить ранее неизвестные детали рельефа. Для северо-западной зоны с весьма расчлененным рельефом возможно и достаточно выбрать шаг сечения 5-10 и более метров, что позволяет получить качественные растровые карты этого района без наложения изобат друг на друга.

На батиметрической карте Ладожского озера (рис.1), построенной на основе упомянутой ЦМР, видна высокая степень структурированности рельефа дна в северо-западной зоне.

Заметны линейность большинства форм рельефа, их упорядоченность и подчиненность нескольким главным направлениям, среди которых наиболее значимым представляется северо-западное. От северо-западной зоны к юго-восточной формы рельефа постепенно теряют линейность и тенденцию к северо-западному направлению, что связано с перекрытием блочных структур щита осадочными породами платформенного чехла.

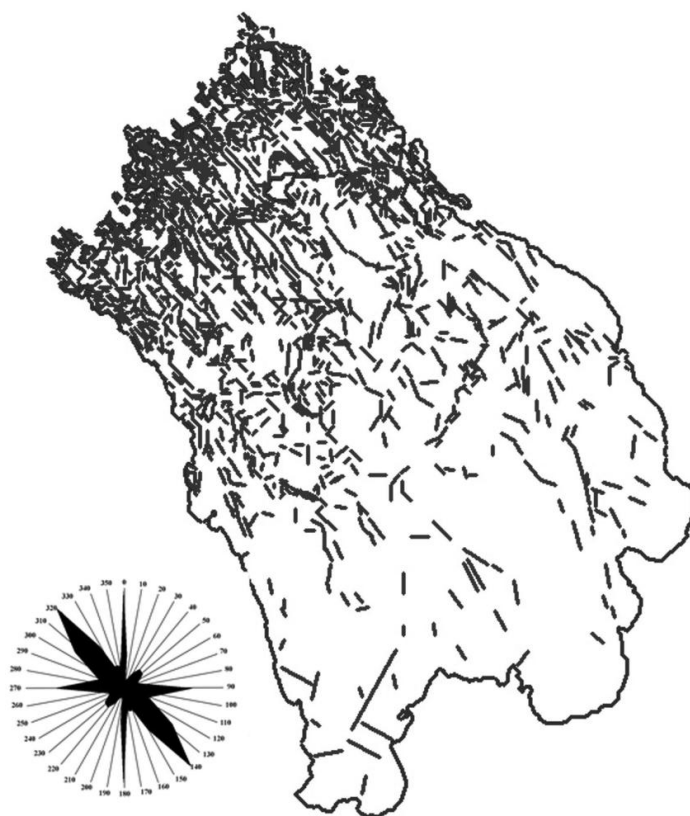


*Рис. 1. Батиметрическая карта Ладожского озера. Изобаты через 2 м.*

На рис. 2 показаны выделенные на батиметрической основе оси протяжённых форм рельефа (первичные линии), проясняющие его общую структуру. В рисунке первичных линий гораздо более четко, чем на батиметрической карте, видны направления и общие закономерности расположения вытянутых форм рельефа: доминирующее северо-западное простираение, заметное регулярное чередование однонаправленных первичных линий.

В ориентации этих линий (см. розу-диаграмму на рис. 2) явно видно наличие трех главных и одной второстепенной систем направлений рельефа, которые имеют направления  $140^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $40^\circ$ - $50^\circ$  (в порядке убывания значимости).

Путем объединения цепочек первичных линий рельефа, имеющих сходные устойчивые направления, выделяются линеаменты – полигенные линейные объекты поверхности, предположительно являющиеся поверхностными выражениями разрывных нарушений [3,4].



*Рис. 2. Оси линейных форм рельефа дна Ладожского озера.*

На рис. 3 приводится схема выделенных линеаментов, на которой видны следующие особенности структурного плана дна Ладожского озера: подчиненность направлений подавляющего большинства линеаментов нескольким главным взаимно ортогональным направлениям, тенденцию к чередованию диагональных систем с определенной протяженностью (около 20-30 км), что указывает на наличие регулярной взаимно ортогональной сети.

В направленности линеаментов, показанной на розе-диаграмме на рис. 3, так же, как и в направленности первичных линий, заметно преобладание следующих систем:  $140^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $40^\circ$ , т.е. при укрупнении линеаментов эти системы сохранили свое направление. При этом общие закономерности направлений сохраняются, хоть и менее выражено, и в юго-восточной, платформенной части дна, что иллюстрирует существенную общность тектонического плана всей площади дна озера.

На рис. 3 нанесены также уже известные разломы, выделяемые на суше – В.А. Рудником, Б.Г. Дверницким, на акватории – А.В. Амантовым [1], Б.А. Ассиновской [6]. Очевидно, что известные разломы хорошо вписываются в систему выделенных авторами линеаментов, что подтверждает ее достоверность.





*Рис. 3. Схема линеаментов дна Ладожского озера. Серые отрезки – линеаменты; тонкие черные отрезки – известные разломы. Роза-диаграмма направленности построена для линеаментов.*

Выделенная сеть линеаментов может служить основой для уточнения и дополнения сети разрывных нарушений.

По-видимому, рисунок линеаментов дна Ладожского озера показывает блоковую расчлененность фундамента, подчиняющуюся 4-м главным направлениям – меридиональному, широтному, диагональному СВ (40-50°) и диагональному ЮВ (140°), т.е. направлениям планетарной трещиноватости, или регматической сети [3,4] с преобладанием СЗ-ЮВ систем направлений.

Выводы:

- несмотря на морфологическую разницу северо-западной и юго-восточной зон Ладоги, системы направлений протяженных форм рельефа одинаковы для всего дна озера и в общем соответствуют направлениям планетарной трещиноватости Земли, с преобладанием СЗ системы;
- выделенная на дне озера сеть линеаментов совпадает с известными дизъюнктивами, и, следовательно, сеть разломов может быть условно прослежена вдоль линий линеаментной сети;
- уточнение расположения дизъюнктивов в районе Ладоги выявляет новые особенности тектонического строения района, что позволяет более обоснованно оценивать сейсмическую опасность, перспективы на эндогенные полезные ископаемые, геоэкологическую обстановку района.

Литература:

1. Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения, №58, 2014. С. 22-32.
2. Амантов А. В., Амантова М. Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения, №59, 2014. С. 5-14.



3. Анохин В. М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. С-Пб.: Недра, 2006. 161 с.
4. Анохин В. М. Строение планетарной линейной сети. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG. Saarbrücken, Germany, 2011. 247 с.
5. Анохин В. М., Маслов Л. А. Закономерности направленности линейных элементов и разломов дна Российской части Японского моря // Тихоокеанская геология. 2009, №2. С. 3-16.
6. Ассиновская Б. А. Сейсмические события на Ладоге в XX веке // Известия РГО. 2005. т. 137. Вып. 4. С. 70-76.
7. Геоэкология Ладожского озера. С-Пб, 1995. 209 с.
8. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас под ред. акад. В. А. Румянцева. Нестор-История. 2015. 200 с.
9. Науменко М. А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Серия географическая. 2013. №1, С. 62–72.
10. Науменко М. А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера. Доклады Академии наук, 1995, том.345, №4, с.514-517.
11. Сорокин А. И. Гидрографические исследования Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
12. Sorokin A., Naumenko M., Veselova M. New morphometrical data of Lake Ladoga. Hydrobiologia, 1996, V.322., p.65 - 67.

## LAWS OF ORIENTATION OF BOTTOM RELIEF OF THE LAKE LADOGA

Vladimir Anokhin,

Sc. D, leading researcher

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

[vladanokhin@yandex.ru](mailto:vladanokhin@yandex.ru)

Mikhael Naumenko

Sc. D, head of the Laboratory of Hydrology

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

[m.a.naumenko@mail.ru](mailto:m.a.naumenko@mail.ru)

Nikolai Nesterov

Sc. D, head of the Laboratory of Geography and Environmental Sciences

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

[mna@mnsspb.ru](mailto:mna@mnsspb.ru)

*Abstract:* The new digital bathymetric model of Lake Ladoga allowed to study of laws extending direction of landforms (lineament analysis) on the bottom of the lake with use of high-quality basis. The study found that despite the significant differences in the types of relief within the north-western and south-eastern areas of bottom of Lake Ladoga the general direction of the linear forms of relief are the same for the entire bottom of the lake. It noted the predominance of these systems direction: 140°, 0°, 90°, 40°, which generally correspond to directions of the network planet Earth fracture. Lineaments of the bottom of the lake coincide with known disjunctive and therefore presumably network faults can be extended along lines of the lineament network.

*Keywords:* Ladoga lake, bottom, topography, direct, lineament, fault

## ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ольга Юрьевна Астраханцева  
младший научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
e-mail: [astra@igc.irk.ru](mailto:astra@igc.irk.ru)

*Аннотация:* Исследование аккумуляции химических компонентов в донных отложениях оз. Байкал крайне важно для геологических целей. Цель данной работы – исследовать особенности осадконакопления в резервуарах оз. Байкал. Установлено, что во всех резервуарах оз. Байкал, кроме Селенгинского, процент утилизации (захоронения) поступающего вещества очень низок вследствие того, что вещество, поступившее с потоком в донные отложения, за отсутствием малой части возвращается с потоком из донных отложений. В четырех резервуарах озера утилизация вещества ничтожна (около 10 %), при этом существуют мощные химические круговороты компонентов. В Селенгинском резервуаре захоранивается 85 % вещества, поступившего с потоком в донные отложения. Химический состав донных отложений резервуаров обусловлен избирательной утилизацией вещества в донные осадки оз. Байкал: с внутриводоемными потоками в донные отложения поступают элементы-комплексобразователи: биогенные элементы,  $R_{орг}$ , часть остального органического вещества, часть основных компонентов – катионов и группа микроэлементов.

*Ключевые слова:* аккумуляция, донные отложения, осадконакопление, оз. Байкал, резервуары.

Исследование аккумуляции химических компонентов в донных отложениях оз. Байкал крайне важно для геологических целей.

Цель данной работы – исследовать особенности осадконакопления в резервуарах оз. Байкал.

Мегасистема “вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды” структурно состоит из вещества пяти резервуаров озера с индивидуальными физико-химическими параметрами и состоянием геохимической среды, и вещества потоков, выпадающих в резервуары и вытекающих из них: реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в реку Ангару [7]. Вещества вод резервуаров оз. Байкал не равновесны по физико-химическим параметрам между собой, но равновесны с веществом окружающей среды, характеризуются индивидуальными структурно-функциональными характеристиками, и в пределах каждого резервуара могут рассматриваться как системы, обладающие целостностью своих функций по отношению к веществу потоков окружающей среды и определяемые в своих границах по физико-химическим параметрам.

Среднеголетние химические составы донных отложений резервуаров оз. Байкал достаточно близки [6]. При этом характеристики приходных и расходных статей содержания компонентов в химических балансах резервуаров озера, показанные в работах [1-5], отличаются как по основным источникам прихода макро-, микрокомпонентов, биогенных элементов и органического вещества, так и по количеству поступления этих компонентов в резервуары. Данное положение можно объяснить сходством функций вещества вод резервуаров озера, в отношении их пропускной и аккумулирующей способностей относительно поступающих с внутренними и внешними потоками основных элементов, микроэлементов, биогенных элементов и органического вещества, заключающейся в открытости – способности частично или полностью пропускать (транзит) и обмениваться между резервуарами следующими компонентами:  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , В, Мо, Hg, Sr,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  и закрытости в отношении остальных

компонентов (части катионов основных компонентов, биогенных элементов, части органического вещества, микроэлементов), которые связываются (вступают в комплексообразование) и остаются в резервуарах (захораниваются или вступают в химический круговорот). По этим компонентам вещество вод резервуаров полуавтономно, закрыто и не обменивается с веществом вод других резервуаров. Различие функций вещества вод резервуаров заключается в том, как расходуются аккумулярованные компоненты: в Селенгинском резервуаре они захораниваются, в остальных небольшая их часть захоранивается, а большая часть вступает в химический круговорот.

С потоком в донные отложения в виде взвеси поступают только активные элементы – элементы-комплексообразователи, а их набор в каждом резервуаре примерно одинаков [1-5], поэтому химический состав донных отложений резервуаров озера близок. Качественные характеристики осадконакопления в резервуарах близки, различием же является скорость осадконакопления: высокая по сравнению с другими резервуарами в Селенгинском резервуаре и низкая в остальных резервуарах.

Сравнение процентного содержания основных, микро-, биогенных элементов и органического вещества в донных отложениях по резервуарам (табл.1) показало, что донные отложения во всех резервуарах на три четвертых состоят из биогенных элементов, а точнее из кремния и железа. Катионы основных компонентов, поступившие с потоком в донные отложения резервуаров, составляют значительный процент. Доля микроэлементов в общем содержании компонентов больше, чем основных компонентов, при этом основное их количество составляет алюминий. Органических веществ в донных отложениях резервуаров мало и основное их количество составляет  $C_{орг}$ .

Таблица 1

Содержания основных, микро-, биогенных элементов и органического вещества в донных отложениях резервуаров оз. Байкал, %

Резервуары	Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный
Компоненты					
донные отложения	100	100	100	100	100
основные компоненты	10	10	8	8	9
микроэлементы	18	17	15	12	13
биогенные элементы	70	71	75	78	77
органические вещества	2	2	2	2	1

Таблица 2

Содержания основных, микро-, биогенных компонентов и органического вещества в веществе потоков в донные отложения в резервуарах оз. Байкал, %

Резервуары	Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный	Оз. Байкал
Поток в донные отложения	100	100	100	100	100	100
основные компоненты	20.3	19	20.8	15.76	21.3	19.5
микроэлементы	5.8	11	4.9	5.7	3.3	6
биогенные элементы	70.6	66	69.1	74.93	73	70.8
органические вещества	3.3	4	5.2	3.5	2.4	3.7

Сравнение химических составов донных отложений и седиментационных потоков (потоков в донные отложения) в резервуарах показало, что они близки: более чем на 70 % состоят из биогенных элементов, микроэлементов и органического вещества (табл. 1, 2).

Следовательно, химический состав донных отложений резервуаров обусловлен избирательной утилизацией вещества в донные осадки оз. Байкал: с внутриводоемными потоками в донные отложения поступают элементы-комплексообразователи: биогенные элементы,  $P_{орг}$ , часть остального органического вещества, часть основных компонентов – катионов и группа микроэлементов. Установлено [1-5], что во всех резервуарах оз. Байкал, кроме Селенгинского,

процент утилизации (захоронения) поступающего вещества очень низок вследствие того, что вещество, поступившее с потоком в донные отложения, за отсутствием малой части возвращается с потоком из донных отложений. В четырех резервуарах озера утилизация вещества ничтожна (около 10 %), при этом существуют мощные химические круговороты компонентов. В Селенгинском резервуаре захоранивается 85 % вещества, поступившего с потоком в донные отложения.

#### Литература:

1. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Южного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2011, № 8 (55), С. 16 – 28.
2. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Селенгинского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012, № 1 (60), С. 20 – 32.
3. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Среднего резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012а, № 3 (62), С. 28 – 42.
4. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Ушканьеостровского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012б, № 5 (64), С. 36 – 50.
5. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Северного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2013, № 3 (74), С. 35 – 47.
6. Астраханцева О. Ю. Среднегодовалые содержания компонентов в донных отложениях Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2014, № 9 (92). С. 53-63.
7. Астраханцева О. Ю. Исследование внутренней (структурной) иерархии вещества вод озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2015, № 4 (99). С. 53-64.

### FEATURES OF SEDIMENTATION IN THE RESERVOIRS OF LAKE BAIKAL

Ol'ga Jur'evna Astrahanceva  
Junior researcher,  
Federal state budgetary institution of science  
of Institute of Geochemistry A. P. Vinogradov SB RAS.  
e-mail: [astra@igc.irk.ru](mailto:astra@igc.irk.ru)

*Abstract:* a study of the accumulation of chemical components in bottom sediments of the lake. Baikal is extremely important for geological purposes. The aim of this work was to study peculiarities of sedimentation in reservoirs oz. Baikal. Found that in all oz tanks. Baikal, the Selenga in addition, the percentage of recycling (disposal) of incoming substances is very low because the substance is admitted for flow in sediments, in the absence of a small part of the returns flow from the bottom sediments. In the four reservoirs of lake disposal of the substance is negligible (about 10 %), while there are strong chemical cycles of the components. The Selenga tank buried 85 % of the substances, received with the stream as sediment. Chemical composition of bottom sediments of the reservoirs due to selective utilization of substances in the sediments of the lake. Baikal: vnutrivakuumnyh flows in sediment do items-complexing agents, nutrients, Rorg, part of the organic matter, part of the main components of cations and the group of trace elements.

*Key words:* accumulation, bottom sediments, sedimentation, oz. Baikal, tanks

**СРЕДНЕМНОГОЛЕТНИЕ СОДЕРЖАНИЯ  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$   
В ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ ВОД, ВЗВЕСИ ВОД, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
РЕЗЕРВУАРОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Ольга Юрьевна Астраханцева,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
e-mail: astra@igc.irk.ru

Олег Юрьевич Палкин  
к.г.н., доцент  
Байкальский государственный университет экономики и права

*Аннотация:* В природных водах, кроме живого вещества, содержится взвешенное мертвое органическое вещество автохтонного и аллохтонного происхождения (детрит), растворенные органические и минеральные вещества, часть которых представлена биогенными элементами. Проблема усиления техногенного пресса на оз. Байкал делает необходимым изучение фонового содержания компонентов органического вещества в водах озера, а так же установление путей миграции этих элементов. Количество  $N_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$  трудно поддается определению аналитическими методами из-за незначительного содержания в органическом веществе вод. Однако данные по расчету  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  необходимы для расчета общего количества этих компонентов, химического баланса вод резервуаров оз. Байкал и установления путей миграции этих компонентов. Вместе с минеральными формами этих компонентов,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  составляют общее количество  $P$ ,  $N$ ,  $S$  в резервуарах озера. Цель данной работы – показать метод расчета  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  в органическом веществе вод, взвеси вод и донных отложениях оз. Байкал по известному в них содержанию органического вещества (ОВ) или  $C_{орг}$ . Зная содержание ОВ или  $C_{орг}$  в водах озера, легко рассчитать  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$ ,  $N_{орг}$  по весовым отношениям  $C/P$ ,  $C/N$ ,  $C/S$  элементов в диатомовых водорослях, а также по атомному соотношению этих компонентов. Поскольку ОВ в водах оз. Байкал – продукт распада планктонных организмов, то вышеприведенный расчет подходит и для расчета  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  во взвеси вод озера, в водах рек, впадающих в оз. Байкал, в иловых водах, в донных отложениях озера в случае отсутствия аналитических данных по какому-либо из этих компонентов.

*Ключевые слова:* органическое вещество, планктон, оз. Байкал, фоновое содержание, компоненты

**Введение**

Проблема усиления техногенного пресса на оз. Байкал делает необходимым изучение фонового содержания макро-, микро-, биогенных элементов и компонентов органического вещества в водах озера. Предмет нашего исследования – вещество вод оз. Байкал – жидкий минерал  $H_2O$  с растворенными и взвешенными компонентами ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al$ ,  $Si$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $H^+$ ,  $O_2$ ,  $As$ ,  $B$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Cd$ ,  $Hg$ ,  $Pb$ ,  $Sr$ ,  $Zn$ ,  $Co$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $Br$ ,  $Rb$ ,  $Mo$ ,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$ ,  $CO_2$ ,  $Ti$ ) – биокосное тело, насквозь пронизанное живым веществом и продуктами жизнедеятельности этого вещества. Количество  $N_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$  в органическом веществе вод озера Байкал незначительно и поэтому трудно поддается определению аналитическими методами. Однако данные по расчету  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  необходимы для расчета общего количества этих компонентов, химического баланса вод резервуаров оз. Байкал и установления путей миграции этих компонентов. Вместе с минеральными формами этих компонентов,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  составляют общее количество  $P$ ,  $N$ ,  $S$  в резервуарах озера.

Цель данной работы – показать метод расчета  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  в органическом веществе вод, взвеси вод и донных отложениях оз. Байкал по известному в них содержанию органического вещества (ОВ) или  $C_{орг}$ .

Кроме неорганических соединений, растворенных в природных водах в виде ионов и газов, в воде почти всегда присутствуют органические вещества. ОВ, находящееся в естественной воде, по своей природе может быть подразделено на входящее в состав живых организмов (планктон), населяющих воду, и на органическое вещество, являющееся продуктом распада живых организмов. К первой группе относятся вещества, входящие в состав планктона – совокупность организмов, населяющих водную толщу: зоо- и фитопланктона, зообентоса, макрофитов, нанопланктона и различных микроорганизмов. Ко второй группе принадлежат многочисленные органические вещества, являющиеся по сложности своего химического состава и строения промежуточными между живыми органическими веществами и простыми неорганическими соединениями. Органическое вещество (ОВ) в самых различных формах своего существования состоит из небольшого сравнительно числа элементов, главным образом из углерода, кислорода и водорода при весьма малых количествах N, P, S, Si, K и некоторых металлов. Но по химическому составу оно чрезвычайно сложно и разнообразно, причем большая его часть находится в коллоидном состоянии. Первая группа органических веществ хотя и влияет на ионный и особенно газовый состав воды, но принадлежит к компетенции биологии, вторая же имеет прямое отношение к химическому составу природных вод. Фитопланктон синтезирует органическое вещество, используя энергию света и биогенные элементы. Зоопланктон потребляет водоросли, бактерии и детрит, минерализует органическое вещество пищи и выделяет в среду биогенные элементы. Мертвый фито- и зоопланктон, его фекалии, экзувии переходят в детрит, оседают на дно и выпадают из планктона. В разложении детрита большую роль играют бактерии. Весь комплекс процессов, состоящих из фотосинтеза, потребления и минерализации органических веществ, в результате которых происходит трансформация веществ и энергии в водной толще, представляет собой метаболизм планктона.

Следовательно, в природных водах, кроме живого вещества, содержится взвешенное мертвое органическое вещество автохтонного и аллохтонного происхождения (детрит), растворенные органические и минеральные вещества, часть которых представлена биогенными элементами.

### **Материалы и методы исследования**

Представленная работа является теоретическим исследованием, в котором использованы аналитические данные, апробированные в научной практике и опубликованные в научной литературе по оз. Байкал [12,13,18 - 20]. Открытая система “вещество вод оз. Байкал” связана с веществом химических потоков окружающей среды определенными коммуникациями, т.е. сетью внешних связей системы. Система “вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды” – сложно динамическая система, имеющая сложную внутреннюю структуру (структурно-организационный момент) и сложную линию поведения в среде (функциональный момент) [9,10]. Установлено, что химическое взаимодействие компонентов вещества вод оз. Байкал и компонентов вещества потоков окружающей среды иерархично [3-7]. Мегасистема “вещество вод озера Байкал – вещество потоков окружающей среды” структурно состоит из вещества пяти резервуаров озера (Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного) и вещества потоков, впадающих в резервуары и вытекающих из них (реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в реку Ангару) (рис. 1). Вещество пяти резервуаров озера находится в разных физико-химических условиях и, соответственно, в индивидуальном физико-химическом состоянии. Фактором, обуславливающим различие физико-химических условий существования, и определяющим внутреннюю структуру физико-химических состояний вещества вод озера Байкал как многорезервуарную систему, является неоднородность сил гравитации по акватории озера из-за геоморфологических характеристик рельефа дна (резкая расчлененность). Вещество резервуаров характеризуется индивидуальными функциональными характеристиками, и в пределах каждого резервуара может рассматриваться как система, обладающая целостностью своих функций по отношению к веществу потоков окружающей среды и определенными физико-химическими параметрами в своих границах.

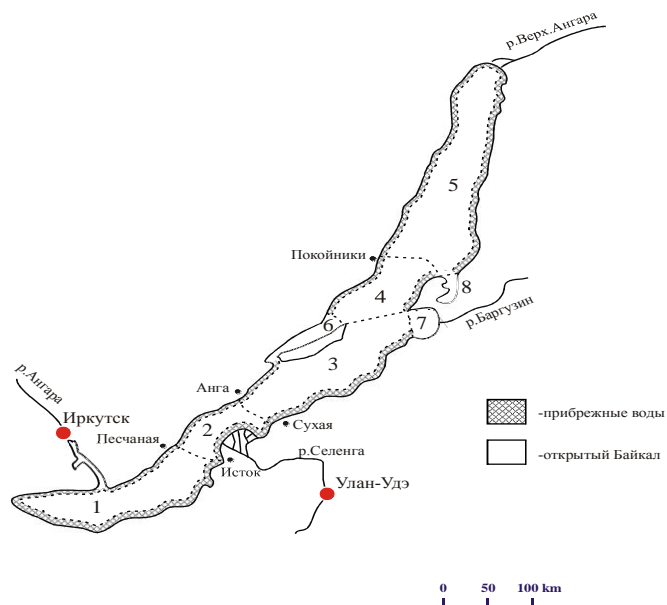


Рис. 1. Схема зональности геохимических состояний вещества вод оз. Байкал (схема пространственно локализованных зон-резервуаров в веществе вод оз. Байкал естественных физико-химических равновесий с веществом окружающей среды, со стабильными физико-химическими параметрами в масштабе исторического времени): 1) Южный; 2) Селенгинский; 3) Средний; 4) Ушканьеостровский 5) Северный; 6) Малое Море; 7) Баргузинский залив; 8) Чивыркуйский залив. Резервуары 1) – 5) разделены на прибрежные воды и открытый Байкал [7].

Установлено, что ОВ на 83 % в поверхностных водах оз. Байкал и на 100 % в глубинных находится в основном в растворенном и коллоидном состоянии [18; 19]. Во взвеси вод оз. Байкал органический детрит составляет от 70 до 98%. Максимальное среднее содержание детрита найдено в водах открытого Байкала, где распространен органический тип взвеси, минимум – в прибрежных водах, т.е. в терригенном типе взвеси [18].

Озеро Байкал относится к экстремальным местообитаниям микроорганизмов из-за низких концентраций питательных органических веществ, низких положительных температур (в среднем  $3.5 - 3.4^{\circ}\text{C}$ ) и высоких давлений в водных толщах. Вследствие концентрационных, газовых и окислительно-восстановительных функций живого вещества микроорганизмы воздействуют на воду, на состав и физико-химическое состояние растворенных в ней органических, неорганических и органо-минеральных веществ. Один из путей перехода растворенных форм элементов (Ca, Si, O, C, N, H, микроэлементы) в твердую фазу – биомеханическая дифференциация растворенного вещества в процессе фотосинтеза: образуются новые компоненты в виде твердых соединений ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , ОВ). Вода же, в свою очередь, воздействует на живые организмы. Характерной чертой ОВ в Байкале, как показано К.К. Вотинцевым с соавторами (1975), является преобладание в его приходной части автотрофного продуцирования, главным образом фитопланктоном, а фитобентос играет второстепенную роль [12]. Отсюда понятно, насколько важно проведение исследований химического состава планктонных организмов. Общая масса растительного планктона, находящегося в толще воды, намного превышает количество водорослей верхнего (25-метрового) продуцирующего слоя. В среднем в течение года в верхнем (фотическом) 25-метровом слое сосредоточено более 5 – 12% общей биомассы фитопланктона, находящейся в 1300-метровом слое воды. В высокопродуктивный 1968 г. в Южном Байкале в верхнем 500-метровом слое под квадратным метром поверхности озера в течение года находилось 83%, в слое 500 – 1000м – 12%, а в придонных горизонтах (1000 – 1300м) – только 5% общей биомассы фитопланктона 1300-метрового слоя. Такое же соотношение и в малопродуктивные годы [15-17].

Известна работа [11], в которой приводится содержание углерода в мелозире от 18 до 36%. Известно, что химический состав фитопланктона не постоянен и зависит от вида водорослей и содержания веществ в воде [1785]. Исследования Е.Н. Тарасовой и А.И. Мещеряковой [1992] по определению углерода, азота и фосфора в водорослях относятся к фитопланктону в открытых участках озера (в 1968г отловлено 10 проб мелозире байкальской, 1969 – 10 проб синедры, в 1976г. – 6 проб перидинеи), так и прибрежной части (3 км от рек Мурино, Снежная, Баргузин, Голоустная, пос. Выдрино), где на 98% фитопланктон состоит из мелозире. Размах колебаний содержания углерода, азота и фосфора для мелозире, синедры и перидинеи незначителен (табл. 1.).

Таблица 1

Содержание углерода, азота, фосфора в доминирующих формах фитопланктона оз. Байкал, [3]

Водоросли	Время отбора	C	N	P	C:N	C:P	N:P
		мкг/мг сухой массы			в атомах		
Melosira baicalensis	Вес на 1968г.	341 ±5	37.2 ±0.2	3.936±0.002	11	22/4	21
Synedra acus	Вес на 1969г.	186 ±4	22±0.15	6.48±0.004	9	74	7.5
Gymnodinium	Зима 1979г.	450 ±5	49.7 ±0.2	5.47±0.003	11	21/3	20

В работе [20] приведены данные [21] по элементному составу водорослей (табл. 2). Отсюда можно рассчитать процентное содержание в сухой массе водорослей  $C_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  и составить таблицу (табл. 3).

Таблица 2

Состав водорослей [18]

Элемент	Элементный состав		Относительный элементный состав (нормализованный по общему растворенному P в молях)
	Сухая масса, мкг/мг (или 0.1г в 100гр.)		
	среднее	пределы колебаний	
C	430	175-615	102
N	55	10-140	11.1
Si	54	0-230	96
K	17.3	1-75	1.3
P	11	0.5-33	1
Na	6.1	0.4-47	0.74
Mg	5.6	0.5-75	0.66
Ca	8.7	0.0-80	0.63
S	5.9	1.5-16	0.54
Fe	5.9	0.2-34	0.32
Zn	0.28	0.005-1.0	0.012
B	0.03	0.001-0.25	0.008
Cu	0.1	0.006-0.3	0.004
Mn	0.06	0.02-0.24	0.003
Co	0.06	0.0001-0.2	0.003
Mo	0.0008	0.0002-0.001	0.00002



Элементный состав диатомовых водорослей

Организм	Зола	C	N	P	S	C	N	P	S	Весовое отношение			Атомное отношение при P=1				
	% от сухого вещества					% от органического вещества				C/P	C/N	C/S	C/P	N/P	S/P	C/N	C/S
Диатомовые водоросли	46.612	45.74	5.85	1.17	0.628	85.62	11	2.21	1.17	38.7	7.8	73.18	102.9	11.35	0.55	9.1	187

### Результаты и обсуждение

Органическое вещество вод оз. Байкал – продукт распада планктонных организмов озера. По известному содержанию органического вещества в водах озера Байкал по формуле  $C = OB * n / 100$  (1), где  $C$  – содержание искомого компонента ( $C_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ ) в мг/л,  $OB$  – известное содержание органического вещества в водах озера, мг/л [12,13,18-20],  $n$  – содержание искомого компонента, в % (табл. 3), можно рассчитать содержания  $C_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  в мг/л в водах озера. В 100 г сухого вещества диатомовых водорослей, обитающих в водах оз. Байкал, содержится 45.74 г углерода, 5.85 г азота, 1.17 г фосфора, 0.628 г серы (табл. 3). Соответственно, весовое отношение C/P равно 38.7, C/N равно 7.8, C/S равно 73.8.

Эмпирическая формула мольного содержания углерода, азота, фосфора и серы в 100 г сухого вещества диатомовых водорослей оз. Байкал –  $C_{3.81} N_{0.42} P_{0.037} S_{0.019}$ . Если принять мольное содержание фосфора за единицу, то атомное отношение углерода к фосфору будет равно 102.9, углерода к азоту – 9.1, углерода к сере – 187, атомное отношение азота к фосфору будет равно 11.35, и серы к фосфору 0.55 соответственно (табл. 3). Зная мольное содержание  $C_{орг}$  в водах оз. Байкал, можно рассчитать в них мольное содержания  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$  и  $S_{орг}$ . Например, рассчитаем мольное содержание  $S_{орг}$  в водах оз. Байкал. Атомное отношение углерода к сере равно 187 (табл. 3). Следовательно, по формуле

$S_{орг} = C_{орг} * m_s / m_c / 187$  (2), где  $S_{орг}$  – неизвестное содержание  $S_{орг}$  в водах оз. Байкал, моль;  $C_{орг}$  – известное содержание  $C_{орг}$  в водах оз. Байкал, моль [1,2,8];  $m_c$  – молекулярный вес  $C_{орг}$ ;  $m_s$  – молекулярный вес  $S_{орг}$  (табл. 4).

Отношение  $C_{орг} / P_{орг}$  во взвеси хорошо совпадает со средними величинами этого отношения в планктоне [14]. Следовательно, зная  $C_{орг}$  для взвеси, легко рассчитать  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$ ,  $N_{орг}$ , содержащихся во взвеси, по весовым отношениям C/P, C/N, C/S элементов для диатомовых водорослей. Поскольку  $OB$  в водах оз. Байкал – продукт распада планктонных организмов, то вышеприведенный расчет подходит и для расчета  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$  в водах рек, впадающих в оз. Байкал, в его донных отложениях.

### Заключение

Установлено весовое отношение  $C_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ , а так же атомное отношение этих элементов в водах, во взвеси вод и рек озера Байкал и его донных отложениях. Весовое отношение углерода к фосфору, углерода к азоту и углерода к сере равно 38.7, 7.8, и 73.18 соответственно. Эмпирическая формула мольного содержания углерода, азота, фосфора и серы в 100 г сухого вещества диатомовых водорослей оз. Байкал –  $C_{3.81} N_{0.42} P_{0.037} S_{0.019}$ . Если принять мольное содержание фосфора за единицу, то атомное отношение углерода к фосфору будет равно 102.9, углерода к азоту – 9.1, углерода к сере – 187, атомное отношение азота к фосфору будет равно 11.35, и серы к фосфору 0.55 соответственно.

#### Литература:

1. Астраханцева О.Ю. Принципы создания модели “Мегасистема “Оз. Байкал””, база данных // Проблемы земной цивилизации. Сборник статей “Поиск решения проблем выживания и безопасности Земной цивилизации”. Вып.6, ч.1. - Иркутск, ASPrint, 2002. - С. 72-121.
2. Астраханцева О.Ю. База данных химического состава вод и потоков оз. Байкал // Экосистемы и природные ресурсы горных стран. Материалы Первого Междунар. симпоз. “Байкал. Современное состояние поверхностной и подземной гидросферы горных стран”. – Новосибирск: Наука. 2004. - С. 233-260.
3. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Южного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2011, № 8 (55), С. 16 – 28.
4. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Селенгинского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012, № 1 (60), С. 20 – 32.
5. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Среднего резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012, № 3 (62), С. 28 - 42.
6. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Ушканьеостровского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012, № 5 (64), С. 36 – 50.
7. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Северного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2013, № 3 (74), С. 35 – 47.
8. Астраханцева О.Ю. Среднегодовалые содержания компонентов в донных отложениях Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2014, № 9 (92). С. 53-63.
9. Астраханцева О.Ю., Глазунов О.М. Исследование и сравнение функциональных характеристик вещества Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2015, № 3 (98). С. 61-70.
10. Астраханцева О.Ю. Исследование внутренней (структурной) иерархии вещества вод озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2015, № 4 (99). С. 53-64.
11. Виноградов А.П. Химический состав планктона // Труды. Бигеохим. лаб. АН СССР. Т. 3. -М., 1939. - С. 32-38.
12. Вотинцев К.К. Биоэнергетическая структура экосистемы пелагиали озера Байкал // Зоол. журнал. – 1971. Т. 50, вып. 2. - С. 165-172.
13. Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. – Новосибирск: Наука, 1975. - 188 с.
14. Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане. Осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998. - 411 с.
15. Поповская Г.И. Годовые изменения фитопланктона // Труды Лимнол. ин-та СО АН СССР, 1971. Т.12(32). - С. 158-169.
16. Поповская Г.И. Пространственная и временная динамика фитопланктона оз. Байкал // Круговорот вещества и энергии в водоемах. - Лиственичное-на-Байкале, 1977. - С. 107-110.
17. Поповская Г.И. Динамика планктона пелагиали (1964-1974гг.) // Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость. – Новосибирск: Наука, 1977а. - С. 5-39.
18. Тарасова Е.Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. – Новосибирск: Наука, СО, 1975. - 147 с.
19. Тарасова Е.Н., Мещерякова А.И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. – Новосибирск: Наука, 1992. - 142 с.
20. Тарасова Е.Н. Компоненты трофического статуса в водах оз. Байкал, Хубсугул и Телецкое // Сибирский экологический журнал. -1998. - № 5. - С. 383-390.
21. Johansen H. Der Baikalsee. Physiographischer und biogeographischer Überblick. // Mitteil. Der Geogr. Ges. In Munchen. – 1925. – Bd. 18, H., 1. - S. 1-202.
22. Hecky R.E., Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effect of enrichment // Limnol. Oceanogr. - 1988, Vol. 33(4). - P 796-823.

**MEAN ANNUAL CONTENT  $P_{\text{opg}}$ ,  $N_{\text{opg}}$ ,  $S_{\text{opg}}$  IN THE ORGANIC MATTER WATER,  
SUSPENDED MATTER OF WATERS, BOTTOM SEDIMENTS OF THE RESERVOIRS OF  
LAKE BAIKAL**

Ol'ga Jur'evna Astrahanceva  
Junior researcher,  
Federal state budgetary institution of science  
of Institute of Geochemistry A. P. Vinogradov SB RAS.  
e-mail: [astra@igc.irk.ru](mailto:astra@igc.irk.ru)

Oleg Jur'evich Palkin  
Ph. D., associate Professor  
Baikalskogo state University of Economics and law

*Abstract:* The purpose of this paper is to show the method of calculating  $P_{\text{opg}}$ ,  $N_{\text{opg}}$ ,  $S_{\text{opg}}$  in the organic matter of the waters of the lake. Baikal, the slurry of water and sediments is known for their content of organic matter (OM) or Sorgue. Knowing the content of S or Sorgue in the waters of the lake, it is easy to calculate Rorg, Org, Porgy weight relationship C/P, C/N, C/S elements diatoms, as well as on the atomic ratio of these components. Since S in the waters of the lake. Baikal – the product of decay of planktonic organisms, the above calculation is suitable for calculating Rorg, Porgy, Or in suspended matter of the waters, in the waters of the rivers flowing into the lake. Baikal, in the interstitial waters in sediments of a lake in the absence of analytical data on any of these components.

*Key words:* organic matter, plankton, oz. Baikal, background content, components

## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ РЕЗЕРВУАРОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ К ТЕХНОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

Ольга Юрьевна Астраханцева,  
младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
e-mail: astra@igc.irk.ru

Ирина Александровна Белозерцева,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Иркутский государственный университет»

Олег Юрьевич Палкин  
к.г.н., доцент

Байкальский государственный университет экономики и права

*Аннотация:* Границы экологических зон и нормативы допустимых воздействий на экосистему оз. Байкал являются важнейшими научными проблемами в формировании экологической политики в Байкальском регионе. Цель данной работы – установление геохимической устойчивости экосистем Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров при попадании химических элементов и органического вещества в оз. Байкал с техногенным стоком. Используются методы изучения макросистем: структурно-функциональный метод и метод балансовых расчетов. Компоненты, являющиеся загрязнителями (элементами первого и второго класса экологической опасности) для озера Байкал определены для каждого резервуара. Общими компонентами для всех глубоководных резервуаров являются:  $Mg^{2+}$ , Al, Si,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ , As, Cr, Cu, Cd, Pb, Co, U, V, Rb, Ti,  $P_{орг}$ ; кроме того, еще: в Южном резервуаре Zn,  $N_{орг}$ , в Среднем:  $K^+$ ,  $Na^+$ , B, Br,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ , в Ушканьеостровском:  $K^+$ ,  $Na^+$ , Mo,  $N_{орг}$ ; в Северном:  $K^+$ ,  $Na^+$ , Ca<sub>2</sub>, B, Br, Mo, Zn,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ . В Селенгинском резервуаре к элементам второго класса экологической опасности относятся  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ , As, Cd, Co, U, V, Mo, Rb, B, Ti,  $PO_4^{3-}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $P_{орг}$ . Элементы третьего класса экологической опасности в резервуарах составляют компоненты, уходящие с потоком в донные отложения и захоранивающиеся в них. В четвертый класс экологической опасности входят легкоподвижные “транзитные” элементы, которые в случае техногенных аварий со стоком озерных вод попадут в соседние резервуары озера и в реку Ангару.

*Ключевые слова:* геохимическая устойчивость, резервуары, оз. Байкал, экосистемы, компоненты, классы экологической опасности

Загрязнение продуктами техногенной деятельности всей окружающей среды и в первую очередь воды – наиболее острая проблема нашего времени, являющаяся следствием неосознанного нарушения Человеком природной системы “вода – порода – газ – органическое вещество”, сложившейся на Земле в течение сотен миллионов лет. Озеро Байкал является самым древним, самым глубоким и самым крупным пресноводным водоемом Земли и как источник воды будущего человечества является громадным мировым потенциалом и потенциалом России. Необходимо сохранять оз. Байкал в состоянии, близком к природному. Отсутствие изученности механизмов взаимодействия вод оз. Байкал и природной составляющей окружающей среды, роли ее потоков в формировании состава вод озера, не позволяет решать конкретные инженерные и экологические задачи, например, прогноз миграции загрязняющих компонентов в водах оз. Байкал. Необходимо изучение природных путей миграции, концентрации и рассеяния в водах

озера макро-, микро-, биогенных элементов и органического вещества, поступающих в озеро с потоками химических компонентов и органического вещества окружающей среды.

Взгляд на оз. Байкал как на макроскопическую систему и применение к ней термодинамических законов, метода равновесия выявляет иерархичность исследуемого объекта – вещества вод озера, состоящего из локально-равновесных участков подсистем. С точки зрения термодинамики вещество вод оз. Байкал, согласно нулевому закону, в целом неравновесная система, состоящая из пяти систем–резервуаров с индивидуальными стабильными среднемноголетними состояниями, равновесными со среднемноголетними состояниями окружающей среды. Вещество вод оз. Байкал испытывает химическое, физическое и тепловое взаимодействие с веществом окружающей среды, т.е. является частью мегасистемы “вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды”. В веществе вод озера Байкал выделены зоны с различающимися физико-химическими условиями формирования вещества, обладающие индивидуальными постоянными тепловыми, химическими и силовыми балансовыми характеристиками по обмену массовым и без массовым веществом с веществом окружающей среды и, соответственно, сохраняющие в масштабе исторического времени свои физико-химические характеристики постоянными – резервуары Южный, Селенгинский, Средний, Ушканьеостровский, Северный [6].

Цель данной работы – установление геохимической устойчивости экосистем Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров при попадании химических элементов и органического вещества в оз. Байкал с техногенным стоком.

Использованы методы изучения макросистем: структурно-функциональный метод и метод балансовых расчетов. Анализ отношений взаимодействия растворенных и взвешенных компонентов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ti}$ ) вод резервуаров оз. Байкал и таковых же компонентов потоков (реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в реку Ангара) раскрывает содержание законов их взаимодействия. Изучены пути миграции и места аккумуляции компонентов, поступающих с потоками химических компонентов и органического вещества природной составляющей окружающей среды в резервуары оз. Байкал [1-5]. Для каждого резервуара установлены компоненты, составляющие аккумулярованное вещество, а так же захоранивающиеся в донных отложениях при избирательной утилизации вещества в резервуаре. Установлено, для каких компонентов резервуары проточны, а для каких являются биогеохимическими барьерами. Определенные в своих границах по физико-химическим параметрам, резервуары оз. Байкал обладают целостностью в отношении своих функций. Сходство функций резервуаров заключается в следующем: из поступивших в резервуары с химическими потоками природной составляющей окружающей среды компоненты  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ , в виде растворенных ионов, транзитом проходят в другие резервуары и реку Ангару, а часть катионов основных компонентов, биогенные элементы, часть органического вещества, целая группа микроэлементов связываются (вступают в реакции комплексообразования) и остаются (аккумулируются) в резервуарах (захораниваются или вступают в химический круговорот). Различие функций резервуаров заключается в том, как расходуются аккумулярованные в них компоненты: в Селенгинском резервуаре они захораниваются, в остальных небольшая их часть захоранивается, а большая часть вступает в химический круговорот.

Таблица 1

Классы экологической опасности компонентов и прогноз их поведения в резервуарах в случае воздействия антропогенной нагрузки на оз. Байкал

Компонен-ты	Южный резервуар	Селенгинс-кий	Средний	Ушканьео-стровский	Северный
K <sup>+</sup>	У Д Ш	У ВД II	У ВД II	У ВД II	С ВД I
Na <sup>+</sup>	У Д Ш	У Д Ш	У ВД II	У ВД II	У ВД II
Ca <sup>2+</sup>	Л IV	Л IV	У Д Ш	Л IV	У ВД II
Mg <sup>2+</sup>	У ВД II	У Д Ш	У ВД II	У ВД II	У ВД II
Al	С ВД I	С Д Ш	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Si	С ВД I	С Д Ш	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Mn <sup>2+</sup>	С В I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Fe <sub>общ</sub>	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Cl <sup>-</sup>	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	С ВД I	У Д Ш	С ВД I	С ВД I	С ВД I
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
As	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
B	Л IV	Л IV	У ВД II	Л IV	У В II
Cr	С ВД I	С Д Ш	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Cu	С ВД I	Л IV	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Cd	У ВД II	У ВД II	С ВД I	У ВД II	С ВД I
Hg	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Pb	С ВД I	У Д Ш	У В II	С ВД I	С ВД I
Sr	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Zn	У ВД II	Л IV	Л IV	У ВД II	С ВД I
Co	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
U	У ВД II	У ВД II	С ВД I	У ВД II	С ВД I
V	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Br	У ВД II	У Д Ш	У ВД II	У ВД II	С ВД I
Rb	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Mo	Л IV	У ВД II	У Д Ш	У ВД II	У ВД II
C <sub>орг</sub>	У Д Ш	У Д Ш	У ВД II	У Д Ш	У ВД II
N <sub>орг</sub>	У ВД II	У Д Ш	У ВД II	У ВД II	У ВД II

$P_{орг}$	СВД I	УВД II	СВД I	СВД I	СВД I
$S_{орг}$	УД III	УД III	УВД II	УД III	УВД II
Ti	СВД I	УВД II	СВД I	СВД I	СВД I

Примечание. С – слабоподвижные накапливаются; У – умеренноподвижные, частично выносятся, частично накапливаются; Л – легкоподвижные выносятся; В – накапливаются в водах; Д – накапливаются в донных отложениях; ВД – накапливаются в донных отложениях и водах, I, II, III, IV – классы экологической опасности

Круг компонентов, совершающих биогеохимические круговороты, определен для каждого резервуара оз. Байкал. Общими компонентами для всех глубоководных резервуаров являются:  $Mg^{2+}$ , Al, Si,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ , As, Cr, Cu, Cd, Pb, Co, U, V, Rb, Ti,  $P_{орг}$ ; кроме того, еще: в Южном резервуаре Zn,  $N_{орг}$ , в Среднем:  $K^+$ ,  $Na^+$ , B, Br,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ , в Ушканьеостровском:  $K^+$ ,  $Na^+$ , Mo,  $N_{орг}$ ; в Северном:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ , B, Br, Mo, Zn,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ . Эти компоненты находятся в водах резервуаров в растворенных и взвешенных формах: в виде взвеси уходят с потоками в донные отложения и в растворенных формах приходят с потоком из донных отложений. В Селенгинском резервуаре в химическом круговороте частично участвуют:  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ , As, Cd, Co, U, V, Mo, Rb, B, Ti,  $PO_4^{3-}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $P_{орг}$ .

Установлена геохимическая устойчивость экосистем каждого резервуара при попадании химических элементов и органического вещества в оз. Байкал с техногенным стоком (табл.).

Озеро Байкал – ультрапресное озеро с малым содержанием биогенных элементов в его водах. Прирост биомассы планктона ограничен поставкой биогенных элементов в трофогенный слой с потоком из донных отложений. Скорость водной миграции элементов позволяет разделить их на три группы: малоподвижные или связанные элементы (элементы, участвующие в химических круговоротах или элементы, захоранивающиеся в донных отложениях), частично выносимые, частично связанные (частично транзитные, частично участвующие в химических круговоротах, частично захоранивающиеся в донных отложениях) и легкоподвижные – “транзитные” компоненты – приходящие с внешней нагрузкой и уходящие со стоком озерных вод в другие резервуары озера и реку Ангару.

Из-за низкого стока озерных вод в резервуарах по сравнению с массами вод в каждом резервуаре, ликвидация техногенных аварий будет крайне медленной. Существующие в каждом резервуаре группы компонентов (“связанных”), участвующие в химическом круговороте, т.е. уходящие с потоком в донные отложения и возвращающиеся с потоком из донных отложений, в случае техногенных аварий с этими компонентами, в четырех резервуарах не будут утилизированы, как в обычных неглубоких континентальных озерах, а с потоком из донных отложений, за исключением ничтожной захороненной части, вернутся обратно, вызывая вторичное заражение и накапливаясь в водах. Эти компоненты будут связаны и не попадут в другие резервуары, но будучи вовлеченными в химический круговорот, нарушат существующие химическое и биологическое равновесия и вызовут этим катастрофические изменения качества вод в этом резервуаре. Любой большой по сравнению с существующим привнос биогенных элементов извне вызовет их накопление в водоеме, сдвинет существующее равновесие “биогенные элементы – живое вещество” и повлечет за собой эвтрофикацию, массовое развитие фито- и бактериопланктона, особенно сине-зеленых водорослей, вызывающих цветение воды и резкое ухудшение ее качества. Другая группа компонентов (“подвижных” или проточных или “транзитных”) – основная часть вещества – в случае техногенных аварий, содержащих эти компоненты, со стоком озерных вод попадет в другие резервуары озера и в реку Ангару. Из-за низкого стока по сравнению с массами вод озера, эти компоненты будут накапливаться в водах озера и, повысив минерализацию озерных вод, опять же вызовут изменение качества воды. Следовательно, только в Селенгинском резервуаре и только техногенный сброс, не содержащий “транзитные” компоненты, будет ликвидирован – утилизирован в донные осадки. В остальных

резервуарах утилизации этих веществ не будет – с потоком из донных отложений они вернутся обратно, вызывая вторичное заражение. Реализация предложенного подхода к оз. Байкал как к многорезервуарной системе позволяет: создать и систематизировать информацию по каждой системе мегасистемы “Оз. Байкал” и по каждому впадающему в озеро потоку; оперативно оценить возможные последствия катастрофического воздействия на экосистему озера. Вещественный баланс резервуаров озера является новым методом оценки его состояния и прогноза изменений в случае антропогенных воздействий. Границы экологических зон и нормативы допустимых воздействий на экосистему оз. Байкал являются важнейшими научными проблемами в формировании экологической политики в Байкальском регионе. В Нормативах допустимых воздействий в “перечень особо опасных веществ” для резервуаров оз. Байкал необходимо включить вещества, изменяющие интенсивность внутренней нагрузки – потока из донных отложений и потока в донные отложения, (элементы первого и второго класса экологической опасности) (табл.1). Компоненты, являющиеся загрязнителями (элементами первого и второго класса экологической опасности) для озера Байкал определены для каждого резервуара. Общими компонентами для всех глубоководных резервуаров являются:  $Mg^{2+}$ , Al, Si,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ , As, Cr, Cu, Cd, Pb, Co, U, V, Rb, Ti,  $P_{орг}$ ; кроме того, еще: в Южном резервуаре Zn,  $N_{орг}$ , в Среднем:  $K^+$ ,  $Na^+$ , B, Br,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ , в Ушканьеостровском:  $K^+$ ,  $Na^+$ , Mo,  $N_{орг}$ ; в Северном:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ , B, Br, Mo, Zn,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $S_{орг}$ . В Селенгинском резервуаре к элементам второго класса экологической опасности относятся  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ , As, Cd, Co, U, V, Mo, Rb, B, Ti,  $PO_4^{3-}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $P_{орг}$ . Элементы третьего класса экологической опасности в резервуарах составляют компоненты, уходящие с потоком в донные отложения и захоранивающиеся в них. В четвертый класс экологической опасности входят легкоподвижные “транзитные” элементы, которые в случае техногенных аварий со стоком озерных вод попадут в соседние резервуары озера и в реку Ангару. Только по элементам, входящим в четвертый класс экологической опасности, резервуары – системы мегасистемы “Оз. Байкал” способны к саморегуляции – удалению их из системы со стоком с течением времени, остальные элементы при попадании резервуары аккумулируются в них – в водах или в донных отложениях.

#### Литература:

1. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Южного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2011, № 8 (55), С. 16 – 28.
2. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Селенгинского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012, № 1 (60), С. 20 – 32.
3. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Среднего резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012а, № 3 (62), С. 28 – 42.
4. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Ушканьеостровского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012б, № 5 (64), С. 36 – 50.
5. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Северного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2013, № 3 (74), С. 35 – 47
6. Астраханцева О. Ю. Исследование внутренней (структурной) иерархии вещества вод озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2015, № 4 (99). С. 53-64.



## GEOCHEMICAL STABILITY OF THE RESERVOIRS OF LAKE BAIKAL TO TECHNOGENIC POLLUTION

Ol'ga Jur'evna Astrahanceva,  
Federal state budgetary institution of science  
of Institute of Geochemistry A.P. Vinogradov SB RAS.  
e-mail: astra@igc.irk.ru

Irina Aleksandrovna Belozerceva  
Federal state budgetary institution of science Institute of geography the SB RAS

Oleg Jur'evich Palkin  
Ph. D., associate Professor  
Baikalskogo state University of Economics and law

*Abstract:* Boundaries of ecological zones and standards for permissible impact on the ecosystem of the lake. Baikal are the most important scientific problems in the formation of environmental policy in the Baikal region. The aim of this work was to establish the geochemical stability of ecosystems of the South, Selenga, Medium, Skaneatles, North of the reservoirs in contact with chemical elements and organic matter in the lake. Baikal anthropogenic runoff. The methods used to study the macro-systems: a structural-functional method and balance calculations. The features that are pollutants (elements of class I and class II environmental risk for lake Baikal is defined for each reservoir. Common components of all deep-water reservoirs are:  $Mg^{2+}$ ,  $Al$ ,  $Si$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{обш}$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $As$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Cd$ ,  $Pb$ ,  $Co$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $Rb$ ,  $Ti$ ,  $P_{опз}$ ; in addition, in the southern reservoir  $Zn$ ,  $N_{опз}$ , Average:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $B$ ,  $Br$ ,  $C_{опз}$ ,  $N_{опз}$ ,  $S_{опз}$ , Oskarovskoy:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mo$ ,  $N_{опз}$ ; North:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca_2$ ,  $B$ ,  $Br$ ,  $Mo$ ,  $Zn$ ,  $C_{опз}$ ,  $N_{опз}$ ,  $S_{опз}$ . The Selenga tank to the elements of the second class of ecological danger are  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $As$ ,  $Cd$ ,  $Co$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $Mo$ ,  $Rb$ ,  $In$ ,  $Ti$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $Fe_{обш}$ ,  $R_{орг}$ . Elements of the third class of ecological danger in the reservoirs are components that go with the flow in sediments, and *zahoranova* in them. In the fourth class of environmental hazards include flowing "in transit" items, which in the case of industrial accidents to the drain of the lake water will fall into the neighboring basins of the lake and the river Angara.

*Key words:* geochemical stability, tanks, oz. Baikal, ecosystem, components, classes environmental hazards

## СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕГАСИСТЕМЫ “ОЗЕРО БАЙКАЛ – ПОТОКИ ПРИРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ”

Ольга Юрьевна Астраханцева,  
младший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
e-mail: astra@igc.irk.ru

Ирина Александровна Белозерцева,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Иркутский государственный университет»

Олег Юрьевич Палкин  
к.г.н., доцент  
Байкальский государственный университет экономики и права

*Abstract:* Проблема формирования и эволюции элементного состава вещества поверхностных вод гидросферы является одной из наиболее актуальных. Цель нашей работы – исследовать внешнюю (функциональную) и внутреннюю (структурную) иерархии вещества вод оз. Байкал при взаимодействии химических компонентов вещества вод оз. Байкал и химических компонентов вещества потоков природной составляющей окружающей среды. Установлено, что химическое взаимодействие вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды иерархично и структура обмена упорядочена именно таким образом: поведение вещества вод озера при обмене веществом и энергией с веществом потоков окружающей среды индивидуализировано в веществе пяти резервуаров озера. Внешняя функциональная иерархия вещества вод резервуаров оз. Байкал проявляется в организации движения (миграции) компонентов и проценте их аккумуляции в донных отложениях резервуаров.

*Ключевые слова:* оз. Байкал, вещество, потоки, химическое взаимодействие, иерархия, резервуары

Проблема формирования и эволюции элементного состава вещества поверхностных вод гидросферы является одной из наиболее актуальных и решение ее является невозможным без тщательного изучения физико-химических параметров этих сложных систем, являющихся продуктом взаимодействия вещества вод исследуемого водного объекта и вещества окружающей среды.

Цель нашей работы – исследовать внешнюю (функциональную) и внутреннюю (структурную) иерархии вещества вод оз. Байкал при взаимодействии химических компонентов вещества вод оз. Байкал и химических компонентов вещества потоков природной составляющей окружающей среды. Вопрос глобального осмысления сценария отношений в системе “воды оз. Байкал – вещество окружающей среды” является ключевым в выяснении структурной и организационной сущности этой системы. Развитие оз. Байкал, как системы взаимодействия его вод с веществом окружающей среды, определяется тепловым потоком от Солнца, химическими потоками из окружающей среды и неоднородностью сил гравитации, направленными к центру Земли. Разновеликое взаимодействие гравитационных полей вод озера Байкал и вещества Земли по акватории озера из-за резкой расчлененности его дна является причиной, обуславливающей локализацию физико-химических состояний вод озера Байкал в виде Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров [15].

В масштабе исторического времени химическое взаимодействие компонентов (химических элементов и органического вещества) вод озера Байкал с компонентами “потоков” природной составляющей окружающей среды – природная, стационарная мегасистема. Эта мегасистема состоит из пяти резервуаров – пространственно локализованных объемов вод озера, физико-химические параметры которых находятся в состоянии равновесия (равенства) с таковыми же параметрами окружающей среды, т.е. постоянны в масштабе исторического времени (периоде нескольких десятков лет), и открытых по отношению к веществу потоков окружающей среды. Модель структуры состояния вод оз. Байкал, равновесных по физико-химическим параметрам с веществом окружающей среды, представляет собой различающиеся среднемноголетние состояния геохимических сред, содержащих макро-, микрокомпоненты, биогенные элементы и органическое вещество, в подсистемах (прибрежные, поверхностные, глубинные, придонные воды) пяти резервуаров оз. Байкал, характеризуемые стабильными среднегодовыми параметрами: температурой, давлением, химическим составом, минерализацией и рассчитанными через эти параметры характеристиками кислотно-основных и окислительно-восстановительных состояний геохимических систем, формами существования элементов [9, 10, 13].

Анализ отношений взаимодействия растворенных и взвешенных компонентов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ti}$ ) вод резервуаров оз. Байкал и таковых же компонентов потоков (реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в реку Ангару) раскрывает содержание законов их взаимодействия. Химические балансы резервуаров озера дают возможность рассмотреть системы-резервуары с позиции отношения их вещества как целого с лежащими вне их объектами – веществами химических потоков внешней среды, т.е. исследовать функции (отклик) вод резервуаров на поступление компонентов вещества потоков окружающей среды. Следовательно, функциональность мегасистемы “воды резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды” определяется характером реакции подсистем резервуаров озера на внешние воздействия.

Созданы базы данных по среднемноголетним содержаниям компонентов:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ti}$  в прибрежных, поверхностных, глубинных, придонных водах, донных отложениях резервуаров озера Байкал и потоках, впадающих и вытекающих из резервуаров озера в другие резервуары озера и в реку Ангару (в %, мг/л) в период 1957 – 1998 гг. [1; 2; 14]. Изучены морфометрические характеристики и водные балансы выделенных резервуаров оз. Байкал и потоков, оценена интенсивность водообмена в резервуарах [3; 4]. Рассчитаны полные среднегодовые массы элементов в веществе каждого потока, втекающего и вытекающего из резервуаров оз. Байкал [5-8; 11].

Предложенный подход к исследованию химического взаимодействия вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды как к многорезервуарной системе позволил сделать следующие выводы:

1. Химическое взаимодействие вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды иерархично и структура обмена упорядочена именно таким образом: поведение вещества вод озера при обмене веществом и энергией с веществом потоков окружающей среды индивидуализировано в веществе пяти резервуаров озера. Химические балансы резервуаров озера позволили установить организованность – свойство вещества оз. Байкал, заключающееся в наличии структуры (пяти резервуаров озера с индивидуальными физико-химическими характеристиками и состоянием геохимической среды), и свойство вещества резервуаров, заключающееся в наличии индивидуального функционирования (индивидуального поведения).

2. Установленные функции систем “резервуары озера Байкал – вещество потоков окружающей среды”: комплексообразование, миграция, избирательный транзит и избирательная утилизация или включение в биогеохимические круговороты компонентов, поступивших в резервуары озера из внешней среды с веществом потоков. Внешняя функциональная иерархия

вещества вод резервуаров оз. Байкал проявляется в организации движения (миграции) компонентов и проценте их аккумуляции в донных отложениях резервуаров.

3. Сходство функций резервуаров озера наблюдается в отношении их пропускной и аккумулирующей способностей относительно поступающих с внутренними и внешними потоками основных элементов, микроэлементов, биогенных элементов и органического вещества, заключающейся в открытости – способности частично или полностью пропускать (транзит) и обмениваться между резервуарами следующими компонентами:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , В, Мо, Hg, Sr,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$  и закрытости в отношении остальных компонентов (части катионов основных компонентов, биогенных элементов, части органического вещества, микроэлементов), которые связываются (вступают в комплексообразование) и остаются в резервуарах (захораниваются или вступают в химический круговорот). Различие функций резервуаров заключается в том, как расходуются аккумулированные компоненты: в Селенгинском резервуаре они захораниваются, в остальных небольшая их часть захоранивается, а большая часть вступает в химический круговорот.

4. В поставке биогенных элементов все резервуары, кроме Селенгинского, находятся на внутреннем обеспечении (потоки из донных отложений), и только Селенгинский резервуар питается внешним привносом. Внешняя и внутренняя нагрузки на протяжении озера, в зависимости от морфологии, резко меняются и индивидуальны в каждом резервуаре. Выявлены большие внутренние нагрузки – потоки из донных отложений в четырех резервуарах озера и незначительная в Селенгинском резервуаре. Установлена ведущая роль внутриводоемных процессов в поступлении и утилизации биогенных элементов,  $\text{P}_{\text{орг}}$ , основных компонентов – катионов и группы микроэлементов в резервуарах оз. Байкал.

5. Утилизация вещества в донные осадки оз. Байкал избирательна: с внутриводоемными потоками в донные отложения поступают биогенные элементы,  $\text{P}_{\text{орг}}$ , часть остального органического вещества, часть основных компонентов – катионов и группа микроэлементов. Установлено, что во всех резервуарах оз. Байкал, кроме Селенгинского, процент утилизации (захоронения) поступающего вещества очень низок вследствие того, что вещество, поступившее с потоком в донные отложения, за отсутствием малой части возвращается с потоком из донных отложений. В четырех резервуарах озера утилизация вещества ничтожна (около 10 %), при этом существуют мощные химические круговороты компонентов. В Селенгинском резервуаре захоранивается 85 % вещества, поступившего с потоком в донные отложения.

#### Литература:

1. Астраханцева О. Ю. Принципы создания модели “Мегасистема “Оз. Байкал””, база данных // Проблемы земной цивилизации. Сборник статей “Поиск решения проблем выживания и безопасности Земной цивилизации”. Вып.6, ч.1. - Иркутск, ASPrint, 2002. - С. 72-121.

2. Астраханцева О. Ю. База данных химического состава вод и потоков оз. Байкал // Экосистемы и природные ресурсы горных стран. Материалы Первого Междунар. симпоз. “Байкал. Современное состояние поверхностной и подземной гидросферы горных стран”. – Новосибирск: Наука. 2004. - С. 233-260.

3. Астраханцева О. Ю. Расчет морфометрических характеристик сложной системы “Озеро Байкал” // Вестник ИрГТУ, 2007, № 4 (32), С.42- 49.

4. Астраханцева О.Ю., Глазунов О.М. Водный баланс мегасистемы “Озеро Байкал”. Вестник ИрГТУ, 2008, № 3 (35), С. 148 – 154.

5. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Южного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2011, № 8 (55), С. 16 – 28.

6. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Селенгинского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012а, № 1 (60), С. 20 – 32.

7. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Среднего резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012б, № 3 (62), С. 28 – 42.

8. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Ушканьеостровского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2012с, № 5 (64), С. 36 – 50.

9. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В. Равновесные физико-химические модели прибрежных вод резервуаров оз. Байкал // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России. Материалы 4 -й Всеросс. конф. молодых ученых (Владивосток. 27 августа – 5 сентября 2012 г.) – Владивосток: Дальнаука, 2012d. – С. 249-258.

10. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В. Равновесные физико-химические модели поверхностных вод резервуаров оз. Байкал // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Труды Всеросс. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 5-летию Ин-та вод. и экол.х проблем СО РАН (Барнаул, 20 – 24 августа 2012 г.). Т.2 – Барнаул, Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2012e. С. 25-31.

11. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В., Глазунов О. М. Химический баланс Северного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ, 2013, № 3 (74), С. 35 – 47.

12. Астраханцева О. Ю. Среднеголетние содержания компонентов в донных отложениях Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2014, № 9 (92). С. 53-63.

13. Астраханцева О. Ю., Чудненко К. В. Расчет форм существования компонентов и характера геохимической среды (Еh, рН, минерализация) в подсистемах – глубинных водах резервуаров оз. Байкал через внутренние физико-химические параметры, равновесные с параметрами окружающей среды // Гелиогеофизические исследования, 2014а, №9 (9). С.30-34.

14. Астраханцева О. Ю. Среднеголетние содержания компонентов в донных отложениях Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2014b, № 9 (92). С. 53-63.

15. Астраханцева О. Ю. Исследование внутренней (структурной) иерархии вещества вод озера Байкал // Вестник ИрГТУ, 2015, № 4 (99). С. 53-64.

## **STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF THE MEGASYSTEM “LAKE BAIKAL – STREAMS OF THE ENVIRONMENT”**

Ol'ga Jur'evna Astrahanceva,  
Federal state budgetary institution of science  
of Institute of Geochemistry A.P. Vinogradov SB RAS.  
e-mail: astra@igc.irk.ru

Irina Aleksandrovna Belozerceva  
Federal state budgetary institution of science Institute of geography the SB RAS

Oleg Jur'evich Palkin  
Ph. D., associate Professor  
Baikalskogo state University of Economics and law

*Abstract:* The problem of the formation and evolution of the elemental composition of the surface waters of the hydrosphere is one of the most relevant. The purpose of our work is to explore the external (functional) and internal (structural) hierarchy of the substance of the waters of the lake. Baikal in the interaction of chemical components of substances of water of lake Baikal. Baikal and chemical components of the substance flow natural component of the environment. It is established that a chemical interaction of the waters of lake Baikal. Baikal and substance flows to the environment is hierarchical and the structure of exchange ordered in this way: the behavior of substances of the waters of the lake when they exchange matter and energy with the substance flows, environmental individualized in matter of five reservoirs of lake. External functional hierarchy of the substance water reservoirs оз. Baikal is manifested in the organization of the movement (migration) of the components and the percentage of their accumulation in bottom sediments of reservoirs.

*Keywords:* оз. Baikal, substance, flow, chemical interaction, hierarchy, tanks

## ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА ОТКРЫТЫХ РАЙОНОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Марина Александровна Барбашова  
к.б.н., научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ИНОЗ РАН,  
E-mail: mbarba@mail.ru

*Аннотация:* По материалам съемок в начале июня и августа 2013 г. исследовано количественное распределение макрозообентоса в открытых районах Ладожского озера на глубинах от 5 до 190 м. Разнообразие природных условий в различных частях акватории озера и антропогенные нагрузки на отдельные районы обуславливают значительную изменчивость количественных показателей донных биоценозов. Уровень развития зообентоса в целом невысок. Максимальные значения численности и биомассы отмечены в южном районе в приустьевых участках рек Волхов и Сясь.

*Ключевые слова:* макрозообентос, Ладожское озеро, численность, биомасса, амфиподы

Ладожское озеро – крупнейший пресноводный водоем Европы. Площадь зеркала озера составляет 17765 км<sup>2</sup>, максимальная глубина – 230 м, средняя – 47,8 м, объем воды в озере – 847,8 км<sup>3</sup> [1]. Батиметрия озера и расположение основных притоков создают предпосылки для образования в его акватории неоднородных районов, отличающихся по глубине, донным отложениям, динамике температурного режима, стратификации и продуктивности. Озеро отчетливо разделено на северную глубоководную и южную мелководную части, между которыми расположены участки дна со средними глубинами. На юге озера находятся обширные относительно мелководные участки, охватывающие открытые прибрежные зоны и заливы (бухта Петрокрепость, губы Волховская и Свирская), благодаря чему южная часть озера оказывается более тепловодной по сравнению с северной.

Уникальная природа и большое значение озера в экономике Северо-Западного региона России обуславливают необходимость систематических наблюдений за состоянием основных биологических сообществ его экосистемы, к которым относится и макрозообентос. Цель настоящей работы – представить результаты исследования донных беспозвоночных в 2013 г. В начале июня и августа 2013 г. был собран материал по макрозообентосу по всей акватории озера на 32 станциях. Сетка станций включала преимущественно станции Гидрометслужбы (ГМ) и несколько станций Института озероведения (ИНОЗ РАН) (рис.1). Пробы отбирались на глубинах от 5 до 190 м. Для сбора на песчаных грунтах применялся дночерпатель Петерсена, на илистых – Экмана-Берджа (площадь захвата 1/40 м<sup>2</sup>; по 2 выемки в каждой точке). Пробы грунта промывались через капроновое сито № 38 и разбирались в полевых условиях, беспозвоночные фиксировались 70% спиртом. Дальнейшая обработка проб осуществлялась в лаборатории.

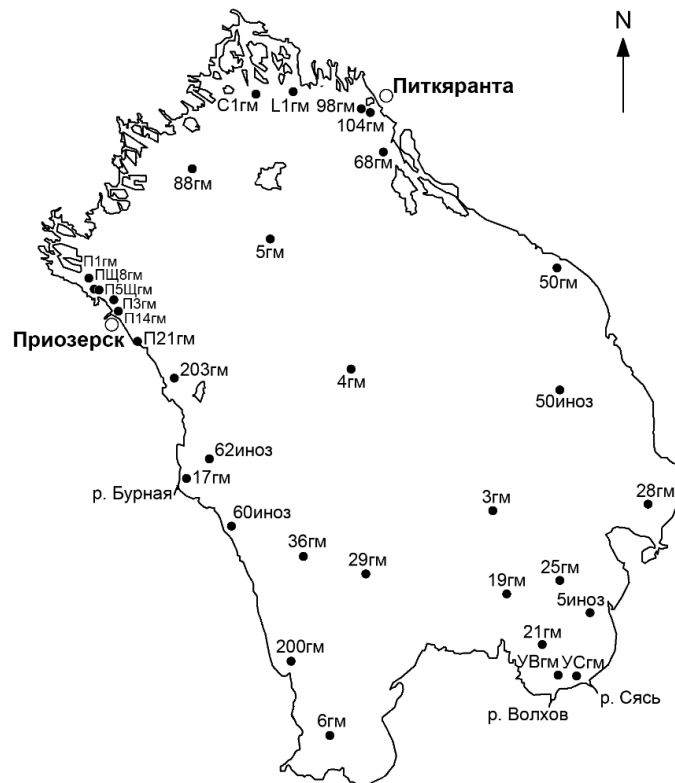


Рисунок 1. Схема станций отбора проб в Ладожском озере в 2013 г.

В 2013 г. в открытых районах озера основу фауны макробеспозвоночных составили представители 4 таксономических групп – Oligochaeta, Chironomidae, Amphipoda и моллюски Bivalvia. Среди остальных групп зообентоса единично отмечались Mermithidae, Mysidacea, Hydracarina, Araneia, моллюски Gastropoda, Trichoptera и Heleidae.

В июне 2013 г. численность бентоса варьировала от 40 до 3080 экз. м<sup>-2</sup>, а биомасса от 0,04 до 29,78 г м<sup>-2</sup>; в августе пределы изменения численности составили 260 – 2840 экз. м<sup>-2</sup>, биомассы – 0,42 – 27,46 г м<sup>-2</sup>. Небольшие величины количественных показателей наблюдались как в северном глубоководном и центральном районах, так и в южной мелководной части озера. Более высокие значения численности и биомассы отмечались в южных заливах, в частности в Волховской губе (табл. 1).

Сообщества макробентоса, населяющие различные части озерной котловины, различаются между собой, как по абсолютным значениям количественных показателей, так и по соотношению основных групп. В северной части озера на серых илах на глубинах более 135 м доминировали олигохеты (в среднем 94% численности и 96% биомассы). В то же время, встреченная на глубине 86 м (ст. L1гм) мизида *Mysis oculata* var. *relicta* Loven, внесла большой вклад в биомассу бентоса (0,76 г м<sup>-2</sup>/ 48%).

Таблица 1

Средние показатели численности и биомассы макрозообентоса и пределы их колебания (min–max) в различных районах озера в 2013 г.

Станция	Глубина (м)	Тип донных отложений	n	Численность, экз. м <sup>-2</sup>		Биомасса, г м <sup>-2</sup>	
				X±SE	min–max	X±SE	min–max
<b>Северный глубоководный район (СР)</b>							
88гм, С1гм, 5гм	135–190	ил серый	4	355±117	140–620	0,73±0,18	0,34–1,04
Л1гм	86	ил серый	1	660		1,6	
<b>В районе г. Питкяранта (ПИТ)</b>							
98гм, 104гм, 68гм	28–63	ил серый	6	1310±155	1040–1800	3,33±0,76	1,98–6,64
<b>В районе г. Приозерска (ПР)</b>							
П1гм, П5Щгм, П3гм	37–81,5	ил серый, ил коричневый	3	840±299	3600–1160	1,63±0,70	0,52–2,44
ПЩ8гм, П21гм, П14гм	15–24,5	песок разнозернистый	5	280±128	40–660	0,44±0,28	0,04–1,40
<b>Центральный район (ЦР)</b>							
4гм	69–70	ил коричневый	2		360–580		0,6–1,16
<b>Западное побережье (ЗБ)</b>							
203гм, 62иноз, 17гм	12–45	ил песчаный	4	955±317	540–1760	2,54±0,99	1,16–4,88
60иноз, 36гм, 200гм	12–22	песок разнозернистый	5	1524±251	760–2020	2,07±0,44	0,78–3,10
<b>Восточное побережье</b>							
50иноз	47	ил серый	1	720		1,14	
50гм	14	песок тонкий	2	740±481	400–1080	0,83±0,75	0,3–1,36
<b>Южный район (ЮР)</b>							
29гм, 3гм, 19гм, 25гм	6,5–42,5	песок мелкий заиленный	7	660±225	160–1800	1,47±0,42	0,64–3,68
<b>Бухта Петрокрепость (БП)</b>							
6гм	6,5–7	песок мелкий	2		760–1420		1,18–6,74
<b>Волховская губа (ВГ)</b>							
УВгм*	6–7	ил серый	2		2840–3080		27,46–29,78
5иноз, 21гм, УСгм	5,1–9	песок разнозернистый	5	1820±360	760–2580	3,74±1,85	1,18–10,22
<b>Свирская губа (СГ)</b>							
28гм	9–9,5	песок тонкий	2		360–620		0,46–0,80

Примечание: n – количество отобранных проб; \* - без учета крупных моллюсков (см. текст).



На северо-востоке озера в районе г. Питкяранта ведущее место в биоценозе занимали олигохеты (в среднем 76% численности, 85% биомассы), на долю хирономид приходилось 22% численности и 12% биомассы. В центральной части озера в биомассе бентоса доля олигохет составила 58%, хирономид 16%, амфипод 26%. На северо-западе в районе г. Приозерска (глубины 37 – 82 м) на илистых грунтах существенную роль в бентофауне играли хирономиды (59% численности, 37% биомассы), амфиподы (24% численности и 33% биомассы) и олигохеты (17% и 30% соответственно). На песчаных биотопах основу биомассы зообентоса определяли олигохеты (60%), хирономиды (11%) и амфиподы (27%). В профундали озера среди олигохет наиболее многочисленны *Lamprodrilus isoporus* Svetlov, *Stylodrilus heringianus* Clap, *Spirosperma ferox* Eisen, из хирономид – *Trissocladius parataticus* (Tschern.).

Вдоль западного побережья на глубинах 12 – 45 м в донных биоценозах в среднем преобладали олигохеты (57% численности, 62% биомассы), на долю амфипод приходилось 19% численности и 27% биомассы (рис.2). Наибольшая биомасса (4,88 г м<sup>-2</sup>), основу которой составили олигохеты (90%), наблюдалась в июне в приустьевом участке р. Бурная (ст. 17гм). Вдоль восточного побережья на илистых биотопах доминировали олигохеты (95% биомассы), на песчаных грунтах биомассу почти в равных долях определяли малощетинковые черви (32%), хирономиды (22%) и амфиподы (42%).

В южной мелководной части озера значительна роль олигохет (77% численности, 74% биомассы всего бентоса), на долю амфипод приходилось лишь 12% численности и 15% биомассы. В Бухте Петрокрепость в среднем биомассу бентоса определяли олигохеты (41%), хирономиды (38%) и моллюски (14%). Здесь доминирующим видом олигохет является *L. isoporus*. Из хирономид наиболее многочисленны виды – *Pseudodiamesa bathyphila* Kieff, *Heterotrissocladius grimschawi* Edw., *Polypedilum scalaenum* Schr., *Cladotanytarsus mancus* Walk, *Micropsectra praecox* (Miegen).

Характерной особенностью Волховской губы является мозаичность распределения бентоса. Непосредственно приустьевые участки залива, куда поступает значительное количество взвеси и биогенных элементов, выделяются более высокими величинами численности и биомассы донных беспозвоночных. Еще в 1961 г. на станции у входного буя р. Волхов биомасса зообентоса составляла 30 г м<sup>-2</sup>, тогда как средняя биомасса бентоса южной части прибрежной зоны в начале 1960-х годов равнялась 1,7 г м<sup>-2</sup> [2].

Максимальная биомасса макрозообентоса как в июне (29,78 г м<sup>-2</sup>), так и в августе (27,46 г м<sup>-2</sup>) 2013 г. отмечалась на илистых грунтах в районе устья р. Волхов. Преобладали олигохеты (в среднем 69% численности и 84% биомассы). Это в основном крупные половозрелые особи *Tubifex newaensis* (Mich.). Необходимо отметить, что в отдельные годы в дночерпательные пробы попадают крупные двустворчатые моллюски, которые регистрируются, но расчеты средних величин количественных показателей макробентоса, проводятся их без учета. Так в августе здесь была встречена унионида *Unio tumidus* Philipsson (20 экз. м<sup>-2</sup>, 63,2 г м<sup>-2</sup>).

На песчаных грунтах биомассу донных биоценозов определяли олигохеты (46%), хирономиды (20%) и моллюски (32%). Наибольшая биомасса зообентоса (10,22 г м<sup>-2</sup>) наблюдалась в июне вблизи устья р. Сясь, где на долю олигохет приходилось 51%, моллюсков – 35%. Сильное развитие тубифицид свидетельствует о большом количестве органики в приустьевых участках рек Волхов и Сясь.

В Свирской губе были встречены только представители олигохет и хирономид, которые в равных долях определяли биомассу зообентоса (рис. 2).

В 2013 г. как в июне, так и в августе наблюдался невысокий уровень развития амфипод, которые были представлены ракообразными *Monoporeia affinis* (Lindstrom) и *Pallaseopsis quadrispinosa* (Sars). Наиболее продуктивной зоной в озере является переходный район (глубины 18 – 50 м). Именно здесь отмечались наиболее высокие количественные показатели бентоса, что связано с массовым развитием в этой зоне реликтовых амфипод, прежде всего *M. affinis*. Известно, что *M. affinis* принадлежит к комплексу доминирующих видов и встречается на всех типах грунтов в широком диапазоне глубин (3 – 236 м). Это единственный вид амфипод, который обитает в настоящее время ниже изобаты 60 м [3].

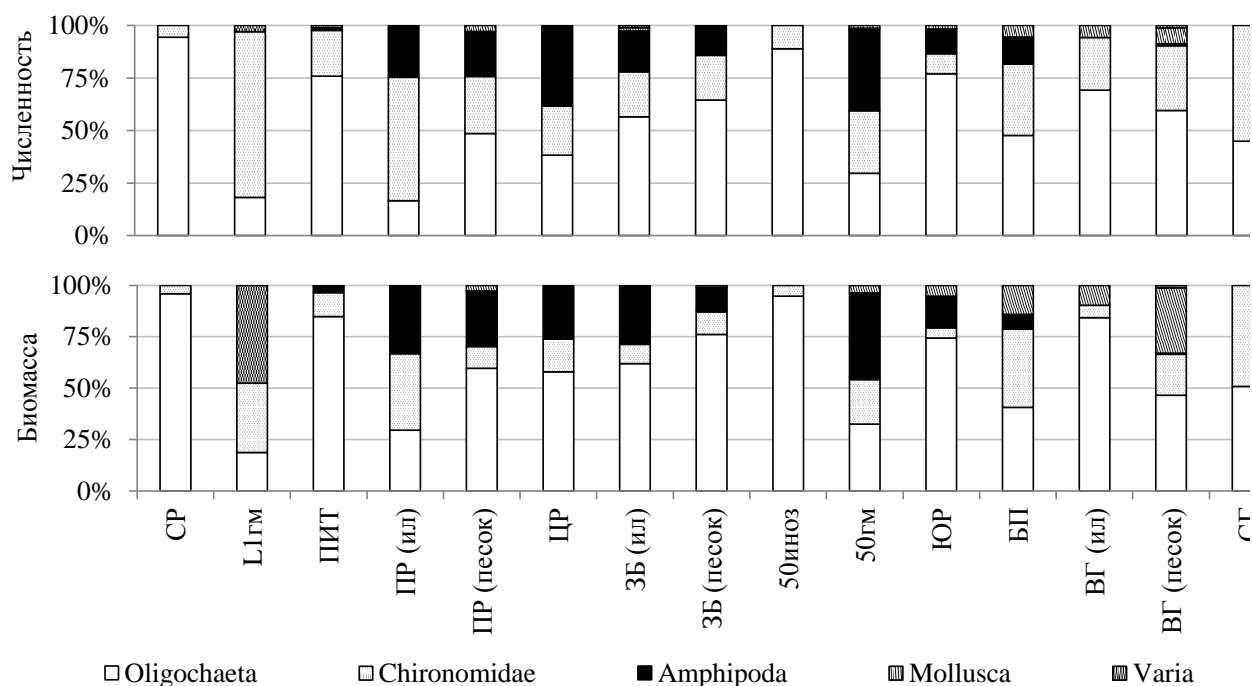


Рисунок 2. Соотношение основных групп макрозообентоса по численности и биомассе в различных районах Ладожского озера в 2013 г. (сокращение названий районов озера как в таблице 1)

За период 1994 – 2008 гг. в переходном районе озера средняя численность *M. affinis* составила  $1345 \pm 199$  экз.  $\text{м}^{-2}$  (пределы колебания 20 – 10720 экз.  $\text{м}^{-2}$ ), а биомасса –  $3,75 \pm 0,54$  г  $\text{м}^{-2}$  (пределы колебания 0,02 – 28,56 г  $\text{м}^{-2}$ ). В 2013 г. этот бокоплав не был зарегистрирован на глубинах более 82 м. На глубинах 18 – 50 м отмечались довольно низкие показатели численности ( $148 \pm 36$  экз.  $\text{м}^{-2}$ , 20 – 440 экз.  $\text{м}^{-2}$ ) и биомассы ( $0,43 \pm 0,13$  г  $\text{м}^{-2}$ , 0,01 – 1,78 г  $\text{м}^{-2}$ ). Максимальная биомасса *M. affinis* при численности 400 экз.  $\text{м}^{-2}$  наблюдалась в августе у западного берега на ст. 62иноз.

*P. quadrispinosa* также предпочитает глубины 18 – 50 м, но встречается значительно реже *M. affinis*, но его вклад в биомассу бывает довольно высок. Средняя численность *P. quadrispinosa* на тех же глубинах за период 1994 – 2008 гг. составила  $41 \pm 9$  экз.  $\text{м}^{-2}$  (пределы колебания 20 – 120 экз.  $\text{м}^{-2}$ ), а биомасса –  $2,19 \pm 1,07$  г  $\text{м}^{-2}$  (пределы колебания 0,02 – 12,8 г  $\text{м}^{-2}$ ). В 2013 г. количественные показатели *P. quadrispinosa* невелики –  $36 \pm 18$  экз.  $\text{м}^{-2}$ ,  $0,09 \pm 0,03$  г  $\text{м}^{-2}$  (пределы колебания 20 – 100 экз.  $\text{м}^{-2}$ , 0,02 – 0,16 г  $\text{м}^{-2}$ ).

Небольшой уровень развития реликтовых амфипод вряд ли свидетельствуют о снижении их роли в донных биоценозах в многолетнем аспекте. Исследования 2013 г. охватывали период поздней биологической весны (начало июня) и лета (начало августа). Усредненные данные за период 1994 – 2008 гг. включали также данные за осенний период, когда происходит увеличение количественных показателей зообентоса за счет индивидуально роста донных организмов. Кроме того распределение этих ракообразных имеет динамический характер, изменяясь в течении суток и по сезонам в связи с характерными для них активными миграциями.

В целом, можно отметить, что значения численности и биомассы в 2013 г. оказались примерно на уровне, свойственным аналогичным глубинам открытых районов озера. Уровень развития бентоса в северном глубоководном районе соответствует среднемноголетним значениям за период 1994 – 2008 гг. В среднем за сезон на глубинах более 140 м биомасса бентоса не превышала 3,76 г  $\text{м}^{-2}$ , а на глубинах 100 – 140 м – 1,97 г  $\text{м}^{-2}$  [3]. Количественные показатели макрозообентоса в центре озера также находятся в пределах межгодовой изменчивости, характерной для данной

акватории озера. Так в период 1994 – 2012 гг. численность донных животных изменялась от 140 до 2580 экз. м<sup>-2</sup>, а биомасса от 0,36 до 8,78 г м<sup>-2</sup> [4].

Пределы колебаний количественных показателей зообентоса по материалам съемки в июне 2013 г. схожи с данными за июнь 2011 г., когда численность макробентоса варьировала от 80 до 2620 экз. м<sup>-2</sup>, а биомасса от 0,04 до 6,58 г м<sup>-2</sup>. Данные съемки в августе 2013 г. также близки значениям численности и биомассы предыдущих лет исследования (табл. 2).

Таблица 2

Пределы изменения (min–max) численности (N) и биомассы (B) макрозообентоса в открытых районах Ладожского озера в разные годы

Период исследования	N, экз. м <sup>-2</sup>		B, г м <sup>-2</sup>	
	min	max	mi n	max
28.07 – 03.08.2006	160	4960	0,4 4	9,80
26.07 – 03.08.2007	160	10060	0,3 3	17,95
25.07 – 27.07.2008	140	3860	0,4 1	10,32
03.08 – 11.08.2010	80	4160	0,1 0	10,37
02.08 – 10.08.2012	140	7280	0,1 4	17,17
01.08 – 09.08.2013	260	2840 /2580*	0,4 2	27,46 /6,64*

Примечание: \* - без учета данных на станции УВгм

Таким образом, разнообразие природных условий в различных частях акватории озера и антропогенные нагрузки на отдельные районы обуславливают значительную изменчивость количественных показателей макрозообентоса. Результаты исследования 2013 г. показали, что в профундали озера видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп остаются достаточно стабильными. Небольшие количественные показатели бентоса отмечались не только в северной глубоководной части озера и в центре, но и в южной открытой акватории озера. Невысокий уровень развития амфипод вероятно связан с сезонными изменениями и активными миграциями ракообразных. Наибольшие значения численности и биомассы донных беспозвоночных, отмеченные в южном районе в приустьевых участках рек Волхов, Сясь и на западном берегу вблизи устья р. Бурная, определяются не только природными, но и антропогенными факторами (поступление повышенного количества органики).

#### Литература:

1. Науменко М. А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели / М.А. Науменко // Известия РАН. Серия Географическая. — 2013. — № 1. — С. 62-72.
2. Науменко М. А. Современное экологическое состояние Волховской губы Ладожского озера / М. А. Науменко, В. А. Авинский, М.А. Барбашова, В. В. Гузиватый, С.Г. Каретников, Л.Л. Капустина, Г.И. Летанская, Г.Ф. Расплетина, И.М. Распопов, М.А. Рычкова, Т.Д. Слепухина, О.А. Черных. // Экологическая химия. — 2000. — № 9 (2) — С. 90-105.
3. Курашов Е. А. Бентос озера / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. С. Дудакова. — Ладога, ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. — СПб: Нестор-История, 2013. — С. 309-319.
4. Барбашова М. А. Многолетние изменения макробентоса центральной части Ладожского озера / М. А. Барбашова // Вода: химия и экология. — 2014. — № 8. — С. 55-61.

## **ASSESSMENT OF THE QUANTITATIVE DEVELOPMENT OF MACROZOOBENTHOS COMMUNITIES OF THE OPEN REGIONS OF LAKE LADOGA**

Marina Aleksandrovna Barbashova,  
Ph. D, research scientist, Laboratory of Hydrobiology,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: mbarba@mail.ru

*Abstract:* Quantitative distribution of macrozoobenthos of the open regions of Lake Ladoga is investigated. The research is based on the materials sampled in early June and August 2013 at depths from 5 to 190 m. Diversity of natural conditions in different parts of the lake waters and anthropogenic pressure on certain areas cause significant variability of quantitative parameters of benthic biocenoses. The level of development of the zoobenthos is generally low. Maximal values of density and biomass are recorded in the southern region in the estuarine areas of rivers Volkhov and Syas.

*Keywords:* macrozoobenthos, Lake Ladoga, density, biomass, amphipods

## НАКОПЛЕНИЕ ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ВНУТРЕННЯЯ ФОСФОРНАЯ НАГРУЗКА

Наталья Александровна Белкина,  
к.г.н., старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра Российской академии наук  
e-mail: bel110863@mail.ru

*Аннотация:* Представлен анализ данных содержания фосфора в поверхностном слое донных отложений Онежского озера за 50 летний период наблюдений (1964-2014 гг.). Рассмотрена динамика накопления фосфора в донных отложениях и ее связь с изменением продукционных процессов в водной экосистеме. Оценено поступление фосфора в донные отложения, их удерживающая способность и внутренняя фосфорная нагрузка.

*Ключевые слова:* Онежское озеро, донные отложения, седиментация и накопление фосфора, внутренняя нагрузка

Малое содержание фосфора в породах водосборной территории определяет лимитирование экосистемы Онежского озера по фосфору, что вызывает особый интерес к процессам трансформации этого элемента в водоеме. По данным многолетних наблюдений в Онежское озеро ежегодно поступает от 900 до 1000 т фосфора, причем 40% фосфора имеет антропогенное происхождение [8]. Значительная доля изменчивой по своему характеру антропогенной составляющей в химическом балансе водного стока, наряду с климатическими изменениями последних лет являются причиной неравномерной внешней нагрузки на водоем, вызывая колебания продукционных процессов в Онежском озере, и как следствие, неравномерный характер поступления органического вещества и биогенных элементов в донные отложения, изменения в химическом составе осадков и внутренней фосфорной нагрузки.

Фосфор поступает в донные отложения Онежского озера с пелитовой фракцией в составе гумифицированного автохтонного и аллохтонного органического вещества (более 50%), коллоидных гидроксидов железа (до 30%) и терригенных минеральных частиц [1]. Его содержание в составе взвешенного вещества, придонного горизонта колеблется от 0,16 до 1%, причем средние показатели для Петрозаводской и Кондопожской губ (0,56 и 0,58%) превышают средние показатели по озеру более чем в 2 раза [3].

Сложная морфология озерной котловины является причиной гетерогенности экосистемы Онежского озера, которая усиливается действием антропогенного фактора, что также влияет и седиментационные процессы. Состав органического вещества поверхностного (0-0,5 см) слоя донных отложений зон аккумуляции в разных районах озера представлен в таблице 1. Качественные и количественные характеристики органического вещества поверхностных взвесей донных осадков в локальных седиментационных бассейнах озера различны, но содержания  $P_{\text{общ}}$  в «наилке» близки (около 0,2%). Что объясняется длительным периодом пребывания высокодисперсного взвешенного материала в водной толще и распределением этих частиц по всей акватории в результате развития гидродинамических процессов. Только поверхностные взвеси в Кондопожской губе имеют более высокие концентрации фосфора (0,3%), что, по-видимому, связано с наличием мощного точечного источника загрязнения этим элементом – Кондопожским ЦБК.

Таблица 1

Химический состав поверхностных взвесей (0-0,5 см) донных отложений Онежского озера, C/N, C/P, K<sub>гум</sub>\*

Район	Н	ППП	P <sub>мин</sub>	P <sub>общ</sub>	C/N	C/P	K <sub>гум</sub>
	м	%					
Открытые районы озера							
Большое Онего	100	20	0,05	0,20	10	47	0,4
	43	12	0,14	0,20	12	54	0,7
Центральное Онего	56	19	0,13	0,20	16	65	0,8
	107	18	0,20	0,40	12	23	-**
Южное Онего	40	15	-	0,20	17	79	0,8
Северо-западные заливы							
Повенецкий залив	98	13	0,12	0,20	17	57	0,4
Великая губа	10	14	0,16	0,19	15	58	0,6
Лижемская губа	46	19	0,11	0,19	16	64	0,6
Уницкая губа	26	16	0,10	0,17	28	64	0,5
Петрозаводская губа	27	14	0,16	0,20	16	58	0,8
Кондопожская губа							
1 км от ЦБК	8	48	0,12	0,20	31	300	2,7
9 км от ЦБК	30	35	0,18	0,30	21	148	2,1
15 км от ЦБК	85	22	0,28	0,30	18	68	1,2
24 км от ЦБК	35	20	0,15	0,20	24	66	0,9

\*K<sub>гум</sub>= C<sub>гк</sub>/C<sub>фк</sub> (отношение углерода гуминовых и фульвовых кислот)

\*\* - нет данных

Содержание фосфора в донных отложениях (слой 0-5 см) Онежского озера увеличивается глубиной залегания и степенью дисперсности осадка. Среднее значение концентрации P<sub>общ</sub> составляет 0,21%, медианное - 0,19%, оно изменяется от 0 до 0,02% в песках, от 0,05 до 0,4% в ила, также встречаются загрязненные осадки с концентрацией до 1%. Сравнение современного распределения фосфора с материалами исследований прежних лет свидетельствует о существенном изменении состава донных отложений, испытывающих антропогенное воздействие, и значительном увеличении площади дна, подверженной эвтрофированию и загрязнению [2,5]. Особенно это проявилось в Петрозаводской, Кондопожской губах и Повенецком заливе, где в районах подверженных влиянию промышленных и бытовых сточных вод нарушается естественная закономерность пространственного распределения элемента. Так, ранее, на примере Кондопожской губы нами было показано, что изменчивость химического состава донных отложений, испытывающих влияние сточных вод ЦБК, связана с их качественным составом и объемами сброса [10]. До 1980 г загрязнение донных отложений здесь носило локальный характер. Введение в эксплуатацию биологической очистки и рассеивающего выпуска сточных вод в 1983 г. привело к увеличению зоны антропогенного влияния и изменению процессов седиментогенеза во всем заливе [1]. Изменение вертикального распределения фосфора в донных отложениях глубоководной станции (80 м) этого залива представлено на рис. 1. Профиль указывает на снижение концентрации фосфора в донных отложениях в течение 20 лет, причем необходимо отметить, что в диагенетических преобразованиях участвует слой осадка мощностью более 20 см.

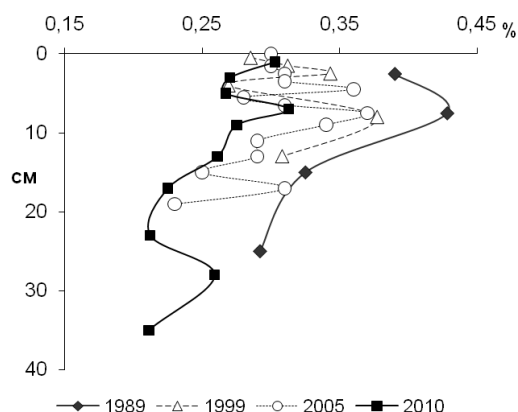


Рис. 1. Распределение  $P_{общ}$  в донных отложениях центральной станции глубоководного района Кондопожской губы Онежского озера (1989-2010 гг.), %.

Оценка изменения содержания фосфора в 20 см слое донных отложений этой станции на протяжении 34 лет показала, что на первом этапе наблюдений, в восьмидесятые годы зафиксирован устойчивый процесс накопления фосфора. В конце девяностых годов началось снижение его концентрации, причем интенсивность потока фосфора из донных отложений достигла максимума в начале века (табл. 2).

Таким образом, донные отложения выполнили роль буфера, с одной стороны замедляющего (за счет изъятия из воды и удержания фосфора в осадке) процесс эвтрофирования водоема в период максимума внешней фосфорной нагрузки (1975-1995 гг.), а с другой стороны, компенсирующего ее снижение в последние годы, за счет отдачи части накопленного запаса элемента обратно в воду.

Таблица 2

Содержание  $P_{общ}$  в слое донных отложениях (0-20 см) центральной станции глубоководного района Кондопожской губы Онежского озера и его поступление из донных отложений в воду (J).

Дата	$P_{общ}$	J	
	г/м <sup>2</sup>	г/(м <sup>2</sup> год)	мг/(м <sup>2</sup> сутки)
1976	57,6		
1983	76,4	-2,68*	-7,3
1989	91,9	-2,58	-7,1
1999	85,3	0,65	1,8
2005	70,3	2,50	6,8
2010	69,6	0,14	0,4

\* - отрицательное значение потока соответствует накоплению элемента в донных отложениях

Аналогичные результаты были получены нами ранее при анализе данных по другим районам. Так, в работе [3] было показано, что в результате увеличения фосфорной нагрузки на водоем в восьмидесятые годы прошлого века содержание элемента в поверхностном слое илов аккумуляционных зон озера к 2005 году увеличилось в 2-3 раза. Рост концентрации фосфора происходил неравномерно. Концентрации фосфора достигли максимума в 2000-х, причем, резкое повышение содержания фосфора в донных отложениях аккумуляционных зон происходит через 3-5 лет после максимума биологических показателей. В Петрозаводской губе максимумы биомассы фитопланктона (2.8 г/м<sup>3</sup>) и бентоса (13.4 г/м<sup>2</sup>) наблюдались в 90-е годы, а в Центральном районе озера (0.8 г/м<sup>3</sup> и 3.51 г/м<sup>2</sup>) – в 2001-2004 гг. [7, 9]. Максимумы содержания фосфора в донных отложениях для этих районов приходятся на 2004 (0.3%) и 2009 гг. (0.4%), соответственно. Время отклика донных отложений аккумуляционных зон, интегрирующих процесс эвтрофирования экосистемы, запущенный в 80-е гг., и который проявился в накоплении фосфора в осадках, для разных районов озера различно (центральный район озера отреагировал на 5 лет позже, чем Петрозаводская губа) [1].

Таким образом, характер изменения концентрации фосфора указывает на сложность процесса накопления фосфора в донных отложениях и неравномерное поступление элемента обратно в воду, которое зависит и от внешних факторов (фосфорная нагрузка на водоем, продукционные процессы и движение элемента по трофическим цепям, седиментационный режим водоема и т.д.), и от внутренних (диагенез, включающий в себя физические, химические и биологические процессы преобразования осадка). Поступивший на дно с органическим веществом фосфор проходит сложную цепь биохимических преобразований бентическими сообществами и, выделяясь в виде фосфатов, часть из которых поступает обратно в воду, часть сорбируется на гидроксосоединениях железа и накапливается в окисленном поверхностном слое донных отложений. Дальнейшее судьба железо-связанного фосфора зависит от окислительно-восстановительного цикла железа, при восстановлении которого происходит высвобождение фосфора [3, 4]. Именно с накоплением железа связана удерживающая способность донных отложений Онежского озера.

Ранее проведенный сравнительный анализ составов взвешенного вещества, поступающего в донные отложения и содержания фосфора в поверхностном (0-5 см) слое осадка показал, что для глубоководных открытых районов озера в водную толщу возвращается не более 5 % поступившего в донные отложения фосфора [1]. В осадках доминирует процесс сорбции фосфора на соединениях железа, конечным результатом которого является образование вивианита. Расчеты для песчаных отложений Южного Онега показали, что под действием течений, развивающихся в придонных водах, происходит неоднократное взмучивание, перенос и переотложение взвешенного материала в результате чего в воду возвращается около 75 % оседающего фосфора. Для илов Петрозаводской и Кондопожской губ, обогащенных фосфором и испытывающих влияние сточных вод, в водную толщу возвращается до 60 %. По мере удаления от источника загрязнения, доля возврата фосфора уменьшается. Например, для станции в центральном районе Кондопожской губы, описанной выше, в среднем она составляет 30% (из них только 10 % возвращается за счет процессов минерализации в поверхностном наилке).

Оценка поступления фосфора из донных отложений Онежского озера, проведенная балансовым методом [6] по данным конца девяностых годов, показала максимальные значения потока (197 т в год, что составляло около 20% от внешней фосфорной нагрузки [2]). Балансовый расчет по данным 2010 г. показал снижение внутренней фосфорной нагрузки по сравнению с данными начала века в два раза (около 80 т в год, табл. 3).

Таблица 3

*Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озера: I – Центральный район, II – Кондопожская губа, III – Петрозаводская губа, IV – Повенецкий залив; J- средняя интенсивность потока (мг P·м<sup>-2</sup>сутки<sup>-1</sup>), Σ- суммарное поступление (т P·год<sup>-1</sup>).*

Тип донных отложений	I		II		III		IV		Всего т P·год <sup>-1</sup>
		Σ	J	Σ	J	Σ	J	Σ	
Пески	0.001	1,4	-*	-	0.01	0.1	0.001	0,3	1,8
Крупно-алевритовый ил	-	-	-	-	-	-	0.02	1,0	1,0
Алевритовый ил	0.030	6,0	-	-	0,2	0,6	0.1	7,0	13,6
Алеврито-пелитовый ил	0.020	5,0	0.3	19,0	0,3	4,0	0.1	18,0	46,0
Пелитовый ил	0.010	7,5	0.01	0.1	-	-	-	-	7,6
Антропогенные осадки		-	1.4	10,0	0,9	6,6	-	-	16,6
Итого:		19,9		29,1		11,3		26,3	86,6

\*- нет данных

Необходимо отметить, что для Кондопожской губы, интенсивность потока для некоторых осадков снизилась почти в 5 раз, в тоже время для Петрозаводской губы (по данным зимних работ 2015 г), в настоящее время эта величина по сравнению с 2010 г. выше, что возможно связано с



сезонной изменчивостью внутренней нагрузки, которая не учитывалась в балансовых оценках, приведенных ранее. Интенсивность потока зависит от степени антропогенного влияния и типа грунта. Его величина за весь период наблюдений на Онежском озере менялась от 0 до 3 мг Р м<sup>-2</sup> сут.<sup>-1</sup> Наибольшие потоки фосфора из донных отложений обычно, фиксируются в вершинной части Кондопожской губы. Средняя для всего озера величина составила 0.1 мг Р м<sup>-2</sup> сут.<sup>-1</sup>, что на порядок выше, чем среднее значение для оз. Байкал - 0.01 мг Р м<sup>-2</sup> сут.<sup>-1</sup> и ниже, чем для Ладожского озера - 0.13 мг Р м<sup>-2</sup> сут.<sup>-1</sup> и для оз. Онтарио - 0.19 мг Р м<sup>-2</sup> сут.<sup>-1</sup>. Разная интенсивность потока элемента из донных отложений определяется количественным и качественным составом фосфора донных осадков.

Формы накопления фосфора в донных отложениях изучались в Кондопожской губе, в осадках которой велика доля органического вещества и отношение С:Р изменяется в широких пределах (от 28 до 335). Максимальные значения свойственны осадкам, расположенным в районе сброса сточных вод ЦБК. Из неорганических форм в донных отложениях доминирует Fe – связанный фосфор. При дефиците кислорода в придонных водах столь значительное накопление этой фракции фосфора потенциально может привести к залповому поступлению фосфат-ионов в водную толщу. Интенсивное накопление фосфора на окислительно-восстановительном барьере в железо-связанной форме рассматривается автором как показатель антропогенного эвтрофирования Кондопожской губы вследствие сброса со сточными водами ЦБК значительного количества фосфора [1, 4].

В заключении необходимо отметить, что гетерогенность экосистемы Онежского озера, обусловленная сочетанием природных и антропогенных факторов, влияет на пространственное распределение фосфора в донных отложениях, который является индикатором продукционных процессов в водоеме. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере в настоящее время по нашим оценкам снизилась. Удерживающая способность донных отложений по отношению к фосфору и время отклика осадков локальных седиментационных бассейнов на изменения, происходящие в экосистеме водоема различны. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766).

#### Литература:

1. Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера/ Н. А. Белкина // Водные ресурсы. – Т. 32, №6, . – 2005.– С. 689-699.
2. Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах / Н. А. Белкина // Водные проблемы Севера и пути их решения / Труды Карельского научного центра РАН. – 2011. – №4. – С. 35-41.
3. Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Онежского озера/ Н. А. Белкина // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. СПб. – 2015. – N 173. – С. 97-109.
4. Белкина Н. А. Сандман О., Игнатьева Н. В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) / Н. А. Белкина // Экологическая химия. – 2006. –15 (3). – С. 174 – 185.
5. Васильева Е. П. Донные отложения/ Е. П. Васильева // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука. – 1990. – С. 147-175.
6. Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме/ Н. В. Игнатьева // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука. – 2002. . – С. 148-156.
7. Калинкина Н. М., Белкина Н. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т. Биоиндикация состояния глубоководных участков Петрозаводской губы Онежского озера по показателям макрозообентоса / Н. М. Калинкина // Водные ресурсы. – 2013. – Том 40, № 5. – С. 488–495.
8. Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений /

П. А. Лозовик // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. – 2016. – №5. – С.35-52.

9. Kalinkina N. M., Sidorova A. I., Galibina N. A., Nikerova K. M. The toxicity of Lake Onego sediments in connection with the natural and anthropogenic factors influence/ N. M. Kalinkina // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. June 18-20, 2015. –Volume 2. Rezekne: Rezeknes Augstskola. – P. 124-127.

10. Natalia A. Belkina The Influence of Pulp and Paper Mill Sewage on the Chemical Composition Sediments of the Kondopoga Bay of Lake Onega / N. A. Belkina // Environment and Natural Resources Research. –2014. –Vol. 4, No. 4. –P.202-207.

## **ACCUMULATION OF PHOSPHORUS IN LAKE ONEGO SEDIMENTS AND INTERNAL PHOSPHORUS LOAD**

Natalia Aleksandrovna Belkina  
Ph. D, senior researcher NWPI KRC RAS  
E-mail: [bel110863@mail.ru](mailto:bel110863@mail.ru)

*Abstract:* data analysis of phosphorus content in the surface layer of Lake Onega sediments in 50 years of observations (1964-2014 gg.) is discussed. Dynamics of accumulation of phosphorus in sediments and its relation with the change of production processes in the aquatic environment s are reviewed. Phosphorus intake in the sediments, their retention capacity and internal phosphorus load is calculated.

*Keywords:* Lake Onego, sediments, sedimentation and accumulation of phosphorous, internal load

## STEPHANOSPHERA PLUVIALIS – РЕДКИЙ ВИД ВОДОРΟΣЛЕЙ, ОБИТАЮЩИЙ НА ЛАДОЖСКОЙ ДАМБЕ

Ольга Николаевна Болдина,  
к.б.н., научный сотрудник лаборатории альгологии  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук  
E-mail: [boldina@binran.ru](mailto:boldina@binran.ru)  
Александр Сергеевич Чунаев,  
к.б.н., доцент  
кафедры генетики и биотехнологии  
Биологический факультет  
Санкт-Петербургский государственный университет  
E-mail: [chunaev\\_as@mail.ru](mailto:chunaev_as@mail.ru)

*Аннотация:* На ладожской дамбе в 2013 году впервые в Ленинградской области обнаружена редкая ценобиальная водоросль *Stephanosphaera pluvialis*, имеющая характерные морфологические особенности, четко отличающие этот монофилетичный род от других зеленых водорослей (*Chlorophyta*). Последующие наблюдения в 2014-2016 гг. свидетельствуют о ее ежегодном периодическом появлении во временных водоемах дамбы.

*Ключевые слова:* *Stephanosphaera*, *S. pluvialis*, *Haematococcaceae*, *Volvocales*, *Chlorophyta*, Ладожское озеро, Ленинградская область, Россия

Планктонная ценобиальная гематококковая водоросль *Stephanosphaera pluvialis* Cohn 1852 в Ленинградской области впервые была обнаружена 1 сентября 2013 года [1]. Место нахождения – небольшие водоемы в выемках и выбоинах гранитных блоков на полукилометровой дамбе у мыса Далёкий (западное побережье Ладожского озера), глубоко вдающейся в воды Ладожского озера в районе деревни Пятиречье. На протяжении последних 70 лет в России – это лишь второе местонахождение *Stephanosphaera* и до сих пор остающееся единственным в Ленинградской области.

Особенностью дамбы является то, что при ее постройке были использованы гранитные блоки с открытой поверхностью неправильной четырехугольной формы (в среднем около 0,6 x 0,6 м). В каждом из блоков высверлены несколько технологических отверстий, по-видимому, необходимых для транспортировки. Отверстия за долгий период нахождения на открытых поверхностях дамбы практически не пострадали и представляют собой цилиндры с диаметром около 3 см и глубиной до 10 см. Многие из них на дне покрыты слоем ила. Помимо этого, во многих блоках образовались выбоины и сколы. Все это способствовало тому, что на протяжении всей длины дамбы ежегодно на протяжении весенне-летне-осеннего периода образуется около 1 тысячи временных водоемов различной емкости и на разной высоте от уровня вод Ладоги. Эти водоемы подвержены стрессовым воздействиям из-за высоких температур и, как следствие, пересыхания (в жаркие периоды лета), и промерзания (весной, осенью и зимой).

Дамба построена финскими крестьянами в конце 1930-х гг. [3] и за почти 80 лет существования практически превратилась в естественное местообитание, органично связанное с экосистемой побережья Ладоги. Гранитные блоки ничем не отличаются от естественных гранитных камней, отделившихся от крупных скалистых формирований. Дамба находится довольно далеко от автомобильных трасс и на расстоянии более 5 км от ближайших поселений. Она мало посещается людьми, лишь иногда к ней пришвартовываются маломерные суда и яхты, изредка посещают люди, в основном рыбаки. Наиболее частыми посетителями дамбы являются чайки. В целом, это место следует считать экологически чистым. И оно обладает определенной спецификой, которая и дает возможность развиваться Стефаносфере.

Обследования водоемов дамбы были нами продолжены в 2014-2016 гг. Эти работы не позволили выявить четких закономерностей появления обильного или умеренного «цветения» Стефаносферы в той или иной частях дамбы. При этом чаще всего эту водоросль находили в дальней от берега части дамбы у маяка или в ее средней части [2]. У входа на дамбу, в одном из наиболее «крупных» водоемов, водоросль встретили лишь в 2015 г. При этом «цветение» в течение летнего и раннего осеннего периода наблюдалось ежегодно.

О присутствии этой водоросли в ваннах на дамбе косвенно может свидетельствовать окружающий их розоватый или серовато-розоватый, реже зеленовато-коричневатый ореол, а также ярко-зеленый цвет воды или присутствие в почти прозрачной воде серовато-зеленоватого хлопьевидного осадка. При этом водоросль в ваннах всегда встречается в природных сообществах организмов, из которых наиболее заметными являются мелкие коловратки (*Rotifera*, *Rotatoria*); ценобии *Desmodesmus* sp. (*Scenedesmaceae*, *Chlorophyta*), и ряд других одноклеточных зеленых водорослей из класса *Trebouxiophyceae*. Помимо них во многих водоемах присутствуют яйца не идентифицированных нами клещей. В лабораторных условиях эти яйца быстро развиваются, и клещи начинают активно питаться водорослями.

По сравнению со многими другими редко наблюдаемыми одноклеточными объектами *S. pluvialis* имеет характерные морфологические особенности, четко отличающие этот монофилетичный род от других зеленых водорослей (*Chlorophyta*) и сравнительно крупные размеры колоний (в среднем 50-70 мкм, иногда до 100 мкм). Отличительной особенностью подвижных ценобиев является наличие 8 одинаковых клеток, вытянутых вдоль стенок ценобия экваториально. Клетки имеют длинные слизистые выросты, соединяющие их со стенкой ценобия, ярко-зеленые пристенные хлоропласты с вырезкой в области ядра и выступающие наружу пары жгутиков. В хлоропластах хорошо заметны несколько крупных пиреноидов с четко различимыми фрагментированными обкладками и крупные оранжевые глазки. Помимо характерных подвижных ценобиев реже могут встречаться малоподвижные и неподвижные со сферическими 4, 8 или 16 клетками. Подробно этот материал изложен нами ранее [1]. В случае обнаружения не характерных ценобиев есть опасность неправильной идентификации материала и, это касается зафиксированного, но не живого материала. Помимо ценобиальных стадий у Стефаносферы имеются и одноклеточные, представленные зооспорами, гаметами, апланоспорами и зиготами.

Главной трудностью для исследователя является поиск материала в активно вегетирующем состоянии. Клетки покоящихся стадий *S. pluvialis* практически неотличимы от таковых у одноклеточных гематококковых водорослей – *Haematococcus* и *Balticola*. Появление *Stephanosphaera* в водоемах обычно связано с дождевой водой, что и явилось причиной появления видового названия «*pluvialis*». Однако, для водоросли, по-видимому, важны и такие моменты как приуроченность к водоемам с каменистым дном и присутствие колонии птиц (обычно чаек). Несмотря на обилие подобных условий в Ленинградской области, все наши попытки обнаружить Стефаносферу в других местах – на прибрежных скалистых поверхностях севернее дамбы или на некоторых островах в Финском заливе – пока не дали положительного результата. Более того, это всего лишь вторая находка на территории России [1]. В мире вид считается очень редким. Большинство находок в последнее время выявлено на территории Европы [5,6]. Во всех случаях подчеркивается спорадический характер появления этой водоросли. По нашему мнению, наиболее вероятными местами нахождения новых популяций Стефаносферы следует рассматривать водоемы на гранитных островах Ладоги.

По-видимому, только наличие большого числа подходящих водоемов на дамбе позволяет этой водоросли поддерживать популяцию и активно вегетировать по крайней мере 1-2 раза в год. Но при этом популяция вида очень мала и может исчезнуть от случайных причин, ведущих к изменению условий местообитания, или под влиянием антропогенных факторов. В 2015 году рядом с дамбой началось строительство неизвестного объекта и укладка бетонных плит для укрепления дороги. Эти мероприятия могут нарушить существующее экологическое равновесие на дамбе, вследствие чего обнаруженный нами редкий вид может исчезнуть. Поэтому мы предлагаем внести вид *Stephanosphaera* в Красную книгу Ленинградской области и поставить вопрос об охранном статусе дамбы и прилегающих к ней территории и акватории.

Работа осуществлена при поддержке плана фундаментальных научных исследований РАН Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. «Биологическое разнообразие...», а также гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-9513.2016.4 «Роль организации и экспрессии генетического материала в наследственной и ненаследственной изменчивости» Руководитель – С.Г. Инге-Вечтомов (ИАС - 1.10.1169.2016).

#### Литература:

1. Болдина О. Н., Уланова А. А., Чунаев А. С. *Stephanosphaera pluvialis* (Volvocales, Chlorophyta) — редкий пресноводный вид северо-запада России //Новости сист. низш. раст. 2014. Т. 48. С. 27–37.
2. Болдина О. Н., Чунаев А. С. Обнаружение вольвоксовой водоросли *Stephanosphaera pluvialis* в российской части Балтийского региона // Материалы IX Межд. экологической школы-конф. в усадьбе «Сергиевка» - памятнике природного и культурного наследия: «Сохранение природной среды и оптимизация ее использования в Балтийском регионе». Санкт-Петербург, Старый Петергоф, 27-28 ноября 2014 г. - СПб.:Изд-во ВВМ, 2014. С. 20-25.
3. Орехов Д. И. Карельский перешеек - земля неизведанная. Часть 8. Восточный сектор. Метсъяпиртти (Запорожское). СПб.: Нива, 2-е изд. 2008. – 212 с.
4. Cohn F. Uber eine neue Gattung aus der Familie der Volvocineen. Z. Wiss. Zool. 1852. H. 4. S. 77–116.
5. Hofbauer W., Gärtner G. Neue Vorkommen der Kranzkugelalge *Stephanosphaera pluvialis* Cohn 1852 (Chlorophyta: Volvocales) in Tirol (Austria). Ber. Naturwiss.-Med. Vereins Innsbruck. 2008. H. 95. S. 35–41.
6. Kaštovsky J. A report of *Stephanosphaera pluvialis* Cohn 1852 (Chlorophyta, Chlamydomphyceae). Fottea. 2008. V. 8, N 2. P. 109–110.

### STEPHANOSPHERA PLUVIALIS – A RARE ALGAE SPECIES, INHABITING LADOGA BREAKWATER

Olga Nickolaevna Boldina,  
Ph. D, research scientist  
Algological department  
Komarov Botanical Institute  
Russian Academy of Sciences,  
E-mail: boldina@binran.ru  
Alexander Sergeevich Chunaev,  
Ph. D, associated professor  
Department of Genetics and Biotechnology  
Biological Faculty  
Saint-Petersburg State university,  
E-mail: chunaev\_as@mail.ru

*Abstract:* A rare cenobial alga *Stephanosphaera pluvialis* with characteristic morphological peculiarities, not allowing to confuse it with any other green algae species (Chlorophyta), was discovered in temporary pools on the Ladoga breakwater in 2013 for the first time in Leningrad region. Later observations in 2014-2016 proved its annual appearance at Ladoga breakwater pools.

*Keywords:* *Stephanosphaera*, *S. pluvialis*, *Haematococcaceae*, *Volvocales*, *Chlorophyta*, Lake Ladoga, Leningrad region, Russia.

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Галина Сергеевна Бородулина,  
к.г.-м.н., старший научный сотрудник  
лаборатории гидрохимии и гидрогеологии  
Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН,  
E-mail: bor6805@yandex.ru  
Игорь Владимирович Токарев,  
к.г.-м.н., ведущий специалист Ресурсного центра "Геомодель"  
Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета  
E-mail: tokarevigor@gmail.com  
Крайнюкова,  
инженер Ресурсного центра "Геомодель"  
Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета  
E-mail: i.a.avramenko@gmail.com

*Аннотация:* Приводятся результаты исследования изотопного состава (дейтерий и кислород-18) природных вод бассейна Онежского озера. Установлено, что изотопный состав воды озера варьирует в очень узком диапазоне по сравнению с атмосферными осадками:  $\delta^{18}\text{O}$  колеблется от -11,5‰ до -9,3‰ и  $\delta^2\text{H}$  от -85‰ до -71‰. Наблюдается небольшая сезонная дифференциация изотопного состава воды в озере - максимальное облегчение в начале лета (в период исчезновения термобара) и утяжеление на всех горизонтах к началу осеннего охлаждения воды. Заливы Онежского озера испытывают сильное влияние изотопически легкого снеготалого речного стока. Диапазон вариаций изотопного состава воды основных притоков значительно шире, чем в озере. Наблюдается четкая сезонная дифференциация состава воды притоков: к концу лета содержание тяжелых изотопов значительно выше, чем зимой, за счет влияния атмосферных осадков теплого периода года и ландшафтных особенностей водосборов. Выявлена зависимость содержания кислорода-18 от заболоченности и озерности водосборов. Зимой изотопный состав воды в притоках значительно легче среднегодовых атмосферных осадков вследствие возросшей доли изотопически легких подземных вод в зимнем речном режиме.

*Ключевые слова:* изотопный состав, Онежское озеро, атмосферные осадки, подземные воды.

### Введение

Природные изотопы, в частности, кислород-18 и дейтерий ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ , далее изотопный состав воды), являются глобальным индикатором движения воды в гидросфере [1, 2]. При рассмотрении задач о формировании изотопного состава поверхностных вод суши одним из главных вопросов является установление генетической связи изотопного состава рассматриваемых объектов и выпадающих атмосферных осадков.

Онежское озеро является вторым по величине после Ладожского озера пресноводным водоемом Европы и является объектом широкого комплексного использования. Начиная с 2009 г. на акватории и водосборе Онежского озера впервые проводится комплекс работ, направленный на изучение динамики водных масс и условий формирования водного баланса озера на базе мониторинга изотопного состава воды.

### Объекты и методы

Исследование воды Онежского озера выполнялись с борта НИС «Эколог» на станциях, расположенных в заливах и открытой части водоема. На большинстве станций пробы воды отбирались батометром с двух горизонтов: поверхностного (1-5 м) и придонного. На отдельных станциях выполнялось более детальное опробование водной толщи (по 4–8 горизонтам). Всего проанализировано 240 проб воды. Отбор большинства проб озерной воды выполнялся в начале июня и в августе-сентябре. Первый период совпадает с исчезновением явления термобара в конце

июня (Онежское озеро, 2010). Вторая серия опробования осуществлялась в период установления в озере гомотермии. В 2015 г. выполнены сезонные опробования (март, июнь, август) на станции Петрозаводской губы (Р2).

С 2009 г. выполняются регулярные наблюдения за изотопным составом атмосферных осадков на станции Петрозаводск. Отбор проб осадков производится на средненедельной основе, отдельно опробуются массивные выпадения. Выполнен анализ 270 проб.

Притоками Онежского озера являются 1152 реки, из которых лишь 52 имеют длину более 10 км [3]. Практически все из них (47 притоков) опробованы в летне-осенний период в 2014-2015 г.г и в марте 2016 г. Водотоки опробованы в нижнем их течении. Проанализировано 117 проб.

Измерения содержаний дейтерия и кислорода-18 в воде выполнялись на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды Picarro L-2120-i (Ресурсный центр «Геомодель» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета).

### Результаты и обсуждение

Изотопный состав воды в Онежском озере варьирует в узком диапазоне по сравнению с атмосферными осадками: концентрация кислорода-18 колеблется от -11,5‰ до -9,3‰ и дейтерия от -85‰ до -71‰ (рис. 1). Кроме того, точки озёрной воды смещены вправо от локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), построенной по результатам регулярных наблюдений 2009–2015 г. Практически все значения озёрной воды оказались несколько тяжелее величины взвешенного среднегодового состава атмосферных осадков  $\delta^{18}\text{O} = -11,8\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -84\text{‰}$ , рассчитанного с учетом распределения объема и состава выпадений (табл.1).

По основным гидрологическим сезонам (период термобара и период его исчезновения, условно – весна и осень) вариации изотопного состава озёрной воды и в поверхностном и придонном горизонтах весной более значительны, чем осенью. При этом к концу лета в результате процессов испарения изотопный состав воды на всех горизонтах значимо более тяжелый, чем весной (рис. 2).

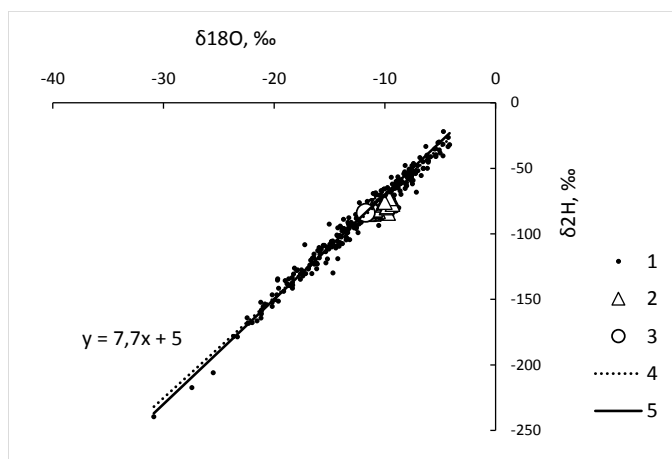


Рис.1. Изотопный состав атмосферных осадков и воды Онежского озера в 2009-2015 г.г. 1 – атмосферные осадки; 2 – Онежское озеро; 3 – средневзвешенный изотопный состав атмосферных осадков; 4 – локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), уравнение на диаграмме; 5 – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ).

Таблица 1

Статистические характеристики изотопного состава атмосферных осадков (%) на станции Петрозаводск

Параметр	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Средневзвешенное	-11,7	-84
Среднее	-12,4	-90
Минимум	-30,9	-239
Максимум	-4,1	-22

Анализ распределения изотопного состава в вертикальном разрезе на станциях открытой части озера показывает, что в период июнь-сентябрь на всех горизонтах диапазон кислорода-18 практически не выходит за пределы значений  $-9,3 \div -10,2$  ‰, дейтерия  $-73 \div -85$  ‰ (рис. 3, станция С1). Наблюдаются небольшие вариации по глубине, но без значимых различий и однонаправленных трендов от поверхности к дну озера. Это подтверждает димиктический тип водоема, в котором дважды в году – весной и осенью – вода полностью перемешивается от поверхности до дна.

В прибрежной зоне озера имеет место более широкий диапазон вариаций изотопного состава в зависимости от сезона (рис. 3, станция Р3).

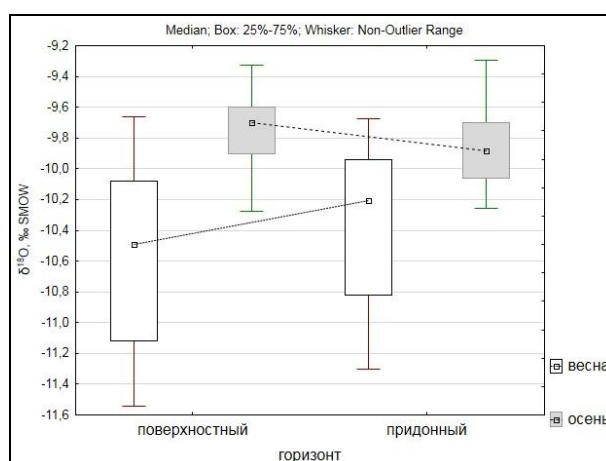


Рис. 2. Распределение статистических величин содержания кислорода-18 в воде Онежского озера по сезонам и в вертикальном разрезе.

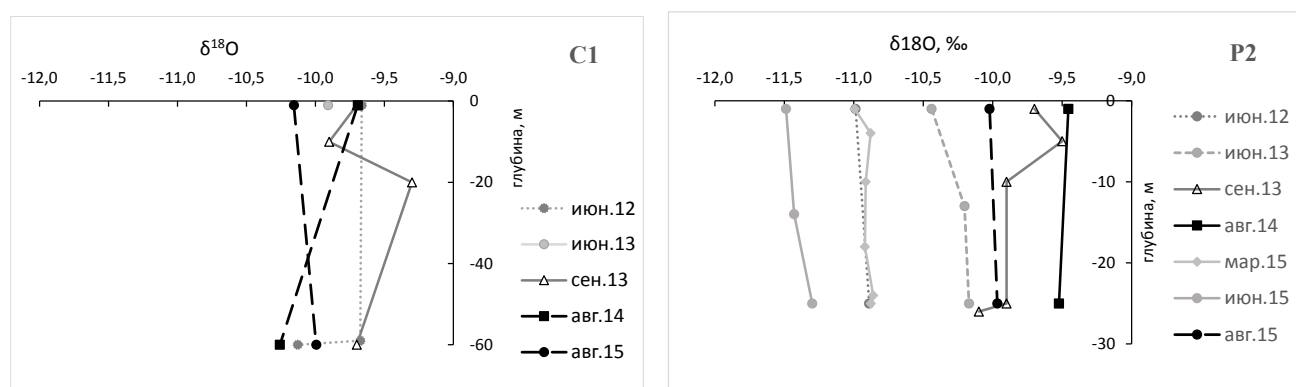


Рис. 3. Концентрация кислорода-18 в воде Онежского озера в вертикальном разрезе открытой части озера (станция С1) и в Петрозаводской губе (станция Р2) в различные сезоны 2012-2015 г.г.

Например, Петрозаводская губа выделяется высокой проточностью, в период открытой воды водообмен составляет 14–20 суток. В губу впадают р. Шуя – вторая по площади водосбора и величине стока река Карелии, и малые реки Лососинка и Неглинка. После таяния льда в результате большего прогрева воды у берегов фронт термобара препятствует водообмену губы с



центральным плесом озера. Изотопный состав воды в Петрозаводской губе в июне оказался самым «легким» среди всех проб Онежского озера и отражает влияние снеготалого речного стока, запертого» в губе термобаром.

Следует отметить, что исследования изотопного состава воды подтверждают неудачный выбор места сооружения водозабора для г. Петрозаводска в вершинной части губы. Качественные характеристики воды здесь в значительной степени определяются влиянием р. Шуи, вода которой имеет низкое природное качество из-за высокого содержания гумусовых веществ и испытывает существенное загрязнение с водосбора [4].

В основных притоках Онежского озера диапазон вариаций изотопного состава воды значительно шире, чем в озере (рис. 4). Наблюдается четкая сезонная дифференциация состава речной воды: летом и осенью содержание тяжелых изотопов значительно выше, чем зимой, и больше величины взвешенного среднегодового состава атмосферных осадков, отражая влияние утяжеления последних в теплый период года. Зимой изотопный состав речной воды оказывался значительно легче среднегодового состава атмосферных осадков из-за влияния изотопически легких подземных вод, питание которых происходит преимущественно в период весеннего половодья за счет осадков холодного периода года.

Точки, отвечающие летним пробам, для многих притоков смещены вправо от ЛЛМВ, в отличие от зимних, что свидетельствует о влиянии процессов испарения на водосборах. Для крупных рек (Шуя, Суна, Водла) зависимость состава от сезона года менее выражена, чем для мелких и средних водотоков, а смещение изотопных составов в область испаренных вод характерно не только для летнего, но и для зимнего сезонов. Начальный изотопный состав воды в притоках можно оценить по точке пересечения линии аппроксимации и ЛЛМВ  $\delta^{18}\text{O} \approx -14,1\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -103\text{‰}$  (рис. 4). Эта величина близка к среднему составу подземных вод региона:  $\delta^{18}\text{O} \approx -13,4\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -94\text{‰}$ , и указывает на подземный источник формирования зимнего речного стока [5]. Отдельные мелкие не озерные реки Западного Прионежья (Деревянка, Уя, Нелукса, Неглинка) имеют преимущественное подземное питание в течение всего года, о чем свидетельствует легкий изотопный состав воды и в летний период (менее  $\delta^{18}\text{O} \approx -12\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -90\text{‰}$ ).

Как известно, гидрохимический режим р.Свирь, вытекающей из Онежского озера, определяется режимом Онежского озера [6]. Изотопный состав речной воды полностью соответствует сезонному изотопному составу воды озера (рис. 4).

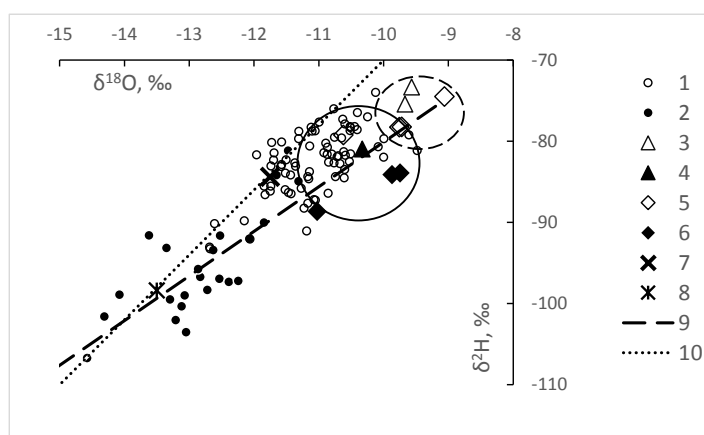


Рис. 4. Изотопный состав воды Онежского озера и его притоков. 1-2 – мелкие и средние притоки: 1 – лето; 2 – зима; 3-4 – исток р. Свирь: 3 – лето; 4 – зима; 5-6 – крупные реки (Шуя, Суна, Водла): 5 – лето; 6 – зима. 7 – средневзвешенный состав атмосферных осадков; 8 – средний состав подземных вод; 9 – линия аппроксимации данных изотопного состава воды притоков в зимний период; 10 – ЛЛМВ. Овалами обозначены области изотопного состава воды Онежского озера: пунктирная линия – лето; сплошная линия – зима.

Следовательно, годовые вариации изотопного состава воды притоков отражают как средние региональные изотопные отношения атмосферных осадков, так и ландшафтные особенности каждого из водосборов и его размеры. Выявлена зависимость концентрации кислорода-18 от заболоченности и озерности отдельных водосборов, для которых рассчитаны эти показатели [7]. С ростом величины озерности и заболоченности увеличивается содержание тяжелых изотопов воды (рис. 5).

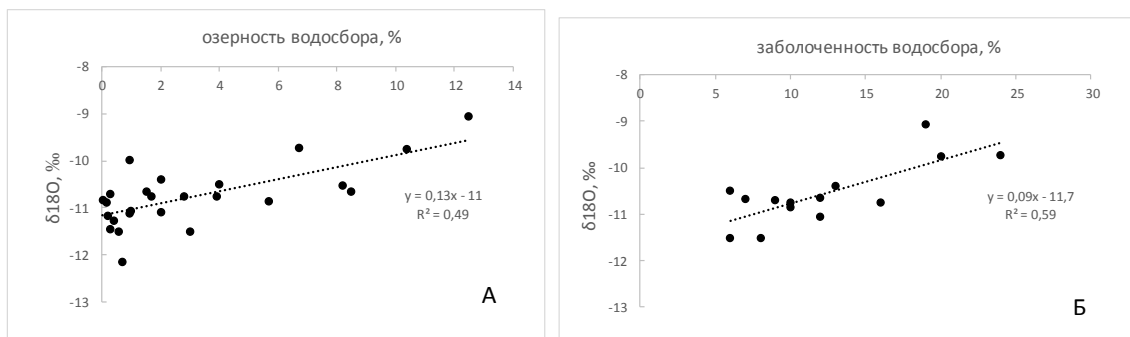


Рис. 5. Зависимость концентрации кислорода-18 в воде притоков Онежского озера в летний период от озерности (А) и заболоченности (Б) водосборов.

### Выводы

Впервые в бассейне Онежского озера выполнен комплекс работ, направленный на изучение динамики водных масс и условий формирования водного баланса озера на базе мониторинга изотопного состава воды (кислорода-18 -  $\delta^{18}\text{O}$  и дейтерия -  $\delta^2\text{H}$ ).

Изотопный состав воды Онежского озера варьирует в узком диапазоне по сравнению с атмосферными осадками: концентрация кислорода-18 колеблется от  $-11,5\text{‰}$  до  $-9,3\text{‰}$  и дейтерия от  $-85\text{‰}$  до  $-71\text{‰}$ . Наблюдается небольшая сезонная дифференциация изотопного состава - максимальное облегчение в начале лета (в период исчезновения термобара) и утяжеление к началу осеннего охлаждения воды. Вода заливов Онежского озера испытывают сильное влияние снеготалого стока и характеризуется большим размахом значений изотопного состава, чем открытая часть озера. Изотопный состав воды в истоке р. Свирь полностью соответствует сезонному изотопному составу воды озера.

Диапазон изотопного состава воды основных притоков Онежского озера значительно шире, чем в озере. Наблюдается четкая дифференциация состава воды притоков по сезонам: летом и осенью концентрация изотопов существенно выше, чем зимой. Для крупных рек (Шуя, Суна, Водла) зависимость состава от сезона года менее выражена, чем для мелких и средних водотоков. Летом изотопный состав притоков Онежского озера в целом изотопически легче озерной воды и отражает средние региональные изотопные значения атмосферных осадков в теплый период года, а также зависит от характеристик водосборной территории – озерности и заболоченности, обуславливающих процесс испарения. Изотопный состав воды в притоках в зимнюю межень указывает на подземный источник формирования зимнего речного стока. Отдельные мелкие не озерные реки имеют легкий изотопный состав воды в течение всего года, что свидетельствует об их преимущественно подземном питании.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766).

### Литература:

1. Ферронский В.И., Дубинчук В.Т., Поляков В.А., Селецкий Ю.Б., Купцов В.М., Якубовский А.В. Природные изотопы гидросферы. – М.: Недра, 1975. 280 с.
2. Ферронский В.И., Поляков В.А., Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир. 2009. 632 с.

3. Онежское озеро. Атлас /Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
4. Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества. Петрозаводск-Куопио, Изд-во КарНЦ РАН, 2006. 263 с.
5. Бородулина Г.С., Токарев И.В. Геохимические и изотопные особенности подземных и поверхностных вод в пределах Онежской палеопротерозойской структуры /Тезисы докладов научной конференции «Комплексные проблемы гидрогеологии». Санкт-Петербург. 2013. С. 11-14.
6. Состояние водных объектов Республики Карелия (по результатам мониторинга 1998-2006 гг.). Петрозаводск. Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 210 с.
7. Карелия и Северо-Запад. Ресурсы поверхностных вод СССР /Под ред. В. Е. Водогрецкого. — Л., 1972 Т. 2. Ч. 1.

## **THE ISOTOPIC COMPOSITION OF NATURAL WATERS OF LAKE ONEGA BASIN**

Galina Borodulina

Ph. D., Senior Researcher Laboratory of Hydrochemistry and Hydrogeology  
Institute of Northern Water Problems Karelian Research Centre of RAS

E-mail: bor6805@yandex.ru

Igor Tokarev

Ph. D., Senior Researcher Resource Center "Geomodel"  
Research Park of Saint-Petersburg State University

E-mail: tokarevigor@gmail.com

Irina Krainiukova

Engineer Resource Center "Geomodel"

Research Park of Saint-Petersburg State University

E-mail: i.a.avramenko@gmail.com

*Abstract:* The results of studies of stable water isotopes (deuterium and oxygen-18) in Lake Onega basin are reported. It is determined that the isotopic composition of lake water varies within a very narrow range in comparison with precipitation:  $\delta^{18}\text{O}$  from -11.5 ‰ to -9.3‰ and  $\delta^2\text{H}$  from -85‰ to -71‰. There is a slight seasonal differentiation of the isotopic composition of lake water with minimum values in the early summer (the period of thermobar disappearance) and maximum to the beginning of autumn water cooling. The isotopically light snowmelt river flow has strong influence on the isotopic composition of water in bays. Isotopes variations in water in the main tributaries of Lake Onega are much wider than in the lake. There is a clear seasonal isotope differentiation in water of tributaries: the content of heavy isotopes in late summer is much higher than in winter due to the influence of atmospheric precipitation in the warm period of the year and landscape features of watersheds. The content of  $\delta^{18}\text{O}$  in waters of tributaries depends on the lakes and swamps percentage on the catchment. The isotopic composition of the tributaries in winter was much easier than average value of annual precipitation due to the increased proportion of isotopically light groundwater in the winter river regime.

*Key words:* isotopic composition, Lake Onega, precipitation, groundwater

## О КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ В РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ГОЛОЦЕНЕ

Никита Николаевич Верзилин,  
д. г-м. н., профессор кафедры физической географии  
Санкт-Петербургского государственного университета  
E-mail: [verzilinn@mail.ru](mailto:verzilinn@mail.ru)

*Аннотация:* В районе Ладожского озера в конце плейстоцена и голоцене сначала существовал ледовый, а затем прохладный гумидный климат, постепенно сменившийся ледовый. Климатические изменения контролировали сток из озера, происходивший первоначально по подледной реке, а затем по обширному проливу. Величина пролива вначале возрастала, а затем постепенно уменьшалась и пролив сменился рекой Невой. Нева существует со времени несколько более раннего, чем началось накопление торфяников в отложениях ее берегов. Длительное существование реки Невы и некоторые другие данные свидетельствуют о значительно большей стабильности тектонических движений в районе Ладожского озера и его окружения, чем обычно считают.

*Ключевые слова:* существование реки Невы, Ладожское озеро, климатические особенности, уровень вод озера, тектоническая стабильность

Прежде, чем рассматривать климатические обстановки в районе Ладожского озера в голоцене, следует упомянуть характеристику основных типов климатов.

При геологических и палеогеографических исследованиях принято климатические обстановки осадконакопления подразделять, согласно теории литогенеза академика Н. М. Страхова [9], на три качественно отличающихся типа, различающиеся по температурным обстановкам и балансу влажности: ледовый, гумидный и аридный. Физическими факторами, положенными в основу выделения этих типов, являются температура и годовой баланс влажности.

Ледовый тип литогенеза существует на территориях, на которых средняя температура года значительно ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , а количество атмосферных осадков преобладает над испарением. Поэтому осадки в виде снега превышают испаряемость и избыток воды в основном, или целиком, выносятся ледником и плавающими льдами в виде фирна и льда.

Гумидный (влажный) тип литогенеза характерен для климатов, при которых средняя температура в течение целого года, или части его, выше  $0^{\circ}\text{C}$ , а сумма атмосферных осадков превосходит испарение и потому избыток воды на суше стекает по ручьям и рекам. Соответственно, «холодная» часть такого климата непосредственно контактирует с ледовым климатом, в случае существования такового в соответствующее время. При этом и граница между такими климатическими обстановками может испытывать не только направленное изменение, но и определенную относительную стабилизацию. Положительный баланс влажности гумидного климата означает, что в течение года на единицу поверхности Земли выпадает больше атмосферных осадков, чем могло бы с нее испариться, даже при расположении на ней водоема или растительного покрова. Соответственно, все расположенные на суше с гумидным климатом водоемы или речные системы, непосредственно не связанные с морскими обстановками, обладают пресными, без признаков повышения солености, водами. Иначе и быть не может, поскольку атмосферные осадки пресные, а их выпадает больше, чем испаряется воды.

Аридный (сухой) тип литогенеза возникает при сочетании среднегодовых температур выше  $0^{\circ}\text{C}$  и сухого климата – климата с отрицательным годовым балансом влажности. В таких обстановках на единицу поверхности Земли в течение года выпадает атмосферных осадков меньше, чем с нее могло бы испариться, если бы она представляла собой поверхность водоема. Отрицательный баланс влажности приводит к тому, что в озерных водоемах и, с затрудненным водообменом, морских развивается осолонение; большинство рек на суше истощается,

заканчиваясь нередко бессточными озерами, солончаками, сухими дельтами. Большую роль играют временные потоки и эрозионная деятельность ветра. Растительный покров, после его развития на суше, в аридном климате слабо развит или даже отсутствует. Конечно, в позднеледниковье и голоцене в районе Ладожского озера такой климат не мог существовать. Господствовал гумидный, причем прохладный климат, и предшествовавший ему – ледовый.

При современной структуре биосферы важнейшими результатами существования гумидного климата на суше является почти сплошной (при условии ненарушенности человеческим воздействием или сильно расчлененным рельефом) растительный покров и развитая система постоянно функционирующих речных сетей. Представляется важным подчеркнуть, что с появлением растительности на суше речные системы в гумидном климате приобрели, очевидно, относительное постоянство своего расположения. Растительный покров, особенно древесный, явился существенным стабилизатором расположения рек. Это следует иметь в виду при рассмотрении послеледникового прошлого окрестностей озер, в частности Ладожского. В то же время, расположение рек, в общем плане, контролируется характером тектонических движений, а он, согласно геологическим данным, является устойчивым во времени независимо от климатических обстановок.

Разве не об исключительно значительной устойчивости общего плана тектонических движений говорит расположение древних долин и ложбин подледникового стока ледниковых вод и положение древнего речного русла, в общем, преимущественно на месте современной р. Невы [1]. Поэтому можно полагать, что р. Нева, или ее предшественница, располагавшаяся примерно так же как современная, существовала уже в конце ледникового времени, когда еще весь ее водоток был перекрыт льдом. То есть, река могла быть подледной, и подо льдом, она формировала свое русло.

С ходом времени ледник прогрессивно таял, и потому на месте подледного стока возник более мощный, но наземный, идущий в виде пролива из освободившейся ото льда юго-западной части Ладожского озера в Финский залив. Ледник формировался при положительном балансе влажности, а сменивший ледовый климат – гумидный, также характеризовался таким балансом. Поэтому при таянии ледника из района его развития выносилось значительно больше воды, чем могло бы при существовании устоявшегося гумидного климата без унаследованного от ледового климата ледникового покрова. Резко выраженный положительный баланс влажности вполне очевиден. В гумидном климате выпадает осадков больше, чем испаряется, а кроме того добавлялось значительное количество воды при таянии ледникового покрова. Поэтому поток вод с территории Ладожского озера и ее водосборов должен был быть значительно больше, чем после деградации ледника, когда влага поступала лишь за счет атмосферных осадков. При этом уменьшение стока происходило, вероятно, в общем постепенно, соответственно прогрессирующему уменьшению площади ледника, вплоть до его исчезновения.

В результате на месте существования подледниковой реки (предшественницы Невы) постепенно, по мере таяния ледника на месте южной части Ладожского озера и ее окрестностей возник мощный пролив, сменивший в конечном итоге первичную р. Неву, возникшую первоначально, как подледниковый водоток. Затем, по мере таяния ледника и уменьшения роли его талых вод, этот пролив, по нашему мнению, постепенно превратился в р. Неву. Когда это имело место сейчас точно сказать нельзя, но можно предполагать, что это произошло, по крайней мере, до начала образования торфяников в береговых обрывах современной р. Невы близ г. Кировска, возрастом около 9550 лет назад. Ведь подошва этих торфяников здесь залегает всего лишь на абсолютной высоте около 7 м. Временами они формировались, вероятно, без перерыва до 3580 лет назад, а при более молодой подошве (7510 лет назад) даже до 3400 лет назад [2]. При этом характерно, что иногда линзочки и прослой торфяников (или обломки древесины) возрастом в пределах 8875-4130 лет назад залегают гипсометрически ниже, упоминавшихся торфяников, а изредка даже несколько ниже обычного современного уровня здесь р. Невы, составляющим около 3,3 м [6]. Такое разновысотное положение одновозрастных торфяников, проявляющееся на незначительных, иногда в пределах 50 м расстояниях, по нашему мнению, вызвано накоплением отложений, вмещающие торфяники, в речной обстановке, о чем подробно говорилось в [2].

Сходные представления, конечно без привлечения радиоуглеродных данных, но с большей детальностью, были опубликованы еще в 1926 г. в обширной статье Н.В. Потуловой, проводившей детальную съемку района верхнего течения р. Невы и нижнего течения р. Мги [8]. Эта исследовательница отмечала, что территория, на которой находится р. Нева, представляет собой низменную сильно заболоченную равнину с торфяниками, поверхность которой часто сочетается с длинными валами, вытянутыми обычно более или менее параллельно р. Неве. Поскольку направление валов строго отвечает современному течению р. Невы, то эту реку следует принимать за остаток водного бассейна, их сформировавшего. Н.В. Потулова указывает, что на основании разнообразных данных она, совместно с М.М. Тетяевым, считает Неву остатком водного бассейна, сократившегося до размеров узкого протока между Ладожским озером и Финским заливом, составлявшими раньше одно целое. По мнению этого исследователя при непосредственном изучении самой Невы она не производит впечатления обычной реки. Скорее это ряд расширений, соединенных более узкими протоками, а встречающиеся местами террасы свидетельствуют скорее о сокращении ее ширины, чем о перемещении русла. Нельзя не согласиться с приведенными мнениями. Можно лишь отметить, что с бурным развитием по Неве плавсредств, ее берега местами стали интенсивно разрушаться.

Работа Н.В. Потуловой для настоящей статьи представляет первостепенное значение, так как четко показывает, что р. Нева возникла на месте и как остаток обширного водного бассейна между Ладожским озером и Финским заливом. И никаких сомнений ни у нее, ни у М.М. Тетяева, относительно ее существования до ныне, не было. Более того, читатель не видит никаких свидетельств о возможности возникновения на месте бывшего обширного пролива в междуречье рек Мги и Тосны возвышенности, могшей привести к ликвидации р. Невы. Не приводится по результатам детальных съемочных работ сведений о тектонических процессах на территории Невы и ее окружения, в частности могших создать водораздел на месте бывшего пролива в низовьях рек Мги и Тосны. Невольно задаешься вопросом, а кто-нибудь доказал его возникновение? Много писалось о его уничтожении вследствие прорыва через него реки Невы в конце голоцена, а надо было сначала обосновать его возникновение.

К сказанному существенно привести данные, полученные М.В. Платоновым, специально изучавшим донные отложения р. Невы [7]. Этот исследователь отмечал, что «на всем протяжении р. Невы между реками Тосна и Мга» [7, стр. 113] эта река существовала уже в начале голоцена. Следовательно, никакого водораздела между реками Мгой и Тосной на месте современной р. Невы в начале голоцена не было.

Представляется, что р. Нева, сменившая интенсивный сток по предшествовавшему ей проливу, будучи полноводной рекой, испытывавшей, как указывалось, избыточный сток при существовании остатков ледника, не могла исчезнуть, при возникновении стока в районе поселка Вещево. Ведь в этом районе нет следов мощных потоков, сходных с Невским. Можно предполагать существование здесь лишь кратковременного, причем мелководного, соединения Ладожского озера с Балтийским морем в анциловое время [4]. Однако оно было лишь незначительным дополнением к стоку по р. Неве. При подъеме уровня анцилового озера р. Нева не могла исчезнуть, напротив, она должна была увеличить свою мощность, так как в условиях гумидного климата сток из Ладоги должен был происходить постоянно и в большом объеме.

Признание отмеченного длительного существования р. Невы, в свою очередь, приводит к представлениям о значительно большей стабильности тектонических движений в районе Ладожского озера и его окрестностей. Так, конечно, нереальным становится схематический спектр террас Карельского перешейка, который был предложен Д.Д. Квасовым [5, рис. 38]. Он неверен, так как фактически в верховьях р. Невы присутствуют торфяники, возрастом почти всего голоцена [2]. Соответственно, показанного в районе этой реки громадного перекоса разновозрастных террас не могло быть.

Если согласиться с мнением, что в течение большей части голоцена сток по р. Неве на юге Ладожского озера не существовал, поскольку Невы еще не было, то не будет оснований считать возможным и интенсивный речной сток в озеро с юга. Ведь согласно высказывавшимся представлениям, в частности в пребореале и бореале, уровень Ладожского озера достигал высот

30-32 м [10]. В такие этапы зона осадконакопления в озере была меньше современной иногда более чем в два раза, причем осушение происходило в южной части озера. Соответственно, если уровень Ладожского озера иногда достигал 30-32 м, а южная часть его превращалась в сушу, приходится считать, что водосборы водоема были еще выше. Но такие представления нереальны. Ведь реки, втекающие сейчас с юга и юго-востока в Ладожское озеро, при таком уровне не могли в него попасть, поскольку озерный уровень был значительно выше уровня воды в этих реках [3]. Так что рассмотренный вариант молодого возраста р. Невы не может быть поэтому принят.

Об относительной тектонической стабильности Ладожского озера в течение, по крайней мере, последних 6 тыс. лет, говорят данные, полученные при изучении озера Волоярви [10]. Уровень этого озера располагался в течение указанного времени не выше 15 м над у. м. Причем в донных осадках его нет следов проникновения ладожских вод. Следовательно, в течение 6 тыс. последних лет уровень Ладожского озера не поднимался до 15 м над у. м. Более того, раз оз. Волоярви не захлестывалось Ладожскими водами, границы максимума ладожской трансгрессии должны быть меньше, чем было принято считать.

Приведенные материалы показывают, что в конце плейстоцена и голоцене в районе Ладожского озера и его окружения существовал прохладный гумидный климат, постепенно сменявшийся ледовый. При этом климатические изменения контролировали сток вод из озера, который осуществлялся сначала по подледной реке (Пра-Неве), затем по обширному проливу, величина которого сначала возрастала, а затем постепенно уменьшалась. В результате пролив сменился р. Невой. Нева существует, по крайней мере, со времени несколько более раннего, чем началось накопление торфяников в отложениях ее берегов (9550 лет назад). Признание длительного существования р. Невы и некоторые другие данные приводят к заключению о значительно большей стабильности тектонических движений в районе Ладожского озера и его окрестностях, чем обычно принято считать.

#### Литература:

1. Атлас «Ленинград. Историко-географический атлас» // Главное управление геодезии и картографии. М. – 1977. – 120 с.
2. Верзилин. Н. Н. Литолого-минералогические особенности позднеледниковых голоценовых отложений долины о. Невы / Н. Н. Верзилин, Е. А. Гонтарев, Н. А. Калмыкова, Н. С. Окнова // Литология и полезные ископаемые. – 1998. – № 2. – С. 133-144.
3. Верзилин Н. Н. К вопросу об относительной стабильности уровня Ладожского озера в голоцене / Н. Н. Верзилин, Г. И. Клейменова // Тихвинская водная система: Коллективная монография / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Широковой. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. – 2012. – С. 163-167.
4. Верзилин Н. Н. Некоторые черты палеогеографии Приладожья в послеледниковье / Н. Н. Верзилин, Г. И. Клейменова, Д. В. Севастьянов // География и геоэкология на современном этапе взаимодействия природы и общества: материалы Всероссийской научной конференции «Селиверстовские чтения» (Санкт-Петербург, 19-20 ноября 2009 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет. – 2009. – С. 594-606.
5. Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы / Д.Д. Квасов. Л.: Изд-во Наука. – 1975. – 278 с.
6. Малаховский Д. Б. Новые данные по истории возникновения Невы / Д. Б. Малаховский, Х. А. Арсланов, Н. А. Гей, Р. Н. Джиноридзе // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: РГО. – 1993. – С. 74-84.
7. Платонов М. В. Донные отложения р. Невы / М. В. Платонов // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 1996. – Вып. 2. – С. 112-120.
8. Потулова Н. В. Геологическое строение района верхнего течения р. Невы и нижнего Мги / Н. В. Потулова // Известия геологического комитета. Т. 43. № 10. – 1926. – С. 1353-1369.
9. Страхов Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли / Н.М. Страхов. Госгеолтехиздат. М. – 1963. – 535 с.

10. Субетто Д. А. Формирование стока Ладожского озера в голоцене и расселение человека / Д. А. Субетто, Х. А. Арсланов, П. М. Долуханов, Г. И. Зайцева, Д. Д. Кузнецов, А. В. Лудикова, Т. В. Сапелко // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. СПб.: Наука. – 2005. – С. 207-214.

#### **ABOUT CLIMATIC AND TECTONIC CHANGES IN REGION OF THE LADOGA LAKE IN GOLOCENE**

Nikita Nikolaevich Verzilin,  
d. g-m. n., professor of the chair of physical geography  
of the Saint-Petersburg University  
E-mail: verzilinn@mail.ru

*Abstract:* In region of the Ladoga lake at the end of Pleistocene and Holocene first existed ice, but then chilly humid climate, gradually changed by ice. Climatic change checked the sewer from lake, occurred originally on subglacial river, but on extensive strait then. The value of the strait in the beginning increased, but then gradually decreased. The strait was changed by river Neva. Neva exists since time several more early, than began the accumulation of peat bog in postponing its coast. Long existence river Neva and some other data are indicative of vastly greater stability tectonic motions in region of the Ladoga lake and its environment, than usually consider.

*Keywords:* existence river Neva, the Ladoga lake, climatic particularities, level of water lake, tectonic stability



## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СРЕДНИХ ГОДОВЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ОЗЕРА НАРОЧЬ

Александр Александрович Волчек,  
д.г.н., декан факультета инженерных систем и экологии  
УО «Брестский государственный  
технический университет»

E-mail: [volchak@tut.by](mailto:volchak@tut.by)

Иван Иосифович Кирвель,  
д.г.н., профессор  
Академия Поморска

E-mail: [kirviel@yandex.by](mailto:kirviel@yandex.by)

Адам Хоиньски,  
д.г.н., профессор  
Институт физической географии  
и формирования природной среды

E-mail: [choinski@amu.edu.pl](mailto:choinski@amu.edu.pl)

Сергей Иванович Парфомук,  
к.т.н., заведующий кафедрой информатики и прикладной математики  
УО «Брестский государственный  
технический университет»

E-mail: [parfom@mail.ru](mailto:parfom@mail.ru)

*Аннотация:* Данные по уровням озера Нарочь разложены на 3 составляющие: полиномиальную регрессию, периодическую составляющую синусоидального характера и остаточную последовательность независимых случайных величин. Выполнено моделирование траектории колебаний с применением детерминированной части, состоящей из регрессии 8-го порядка и периодической составляющей, а также случайной части, состоящей из независимых одинаково распределенных величин. Смоделированная траектория длиной 200 значений показала вероятность превышения максимального годового уровня, равную 1 %.

*Ключевые слова:* моделирование, уровень, траектория, колебания, озеро, Нарочь.

### **Введение**

Нарочь – самое большое озеро в Беларуси, расположенное в северо-западной части страны на границе с Литвой. Основное направление рационального использования озера Нарочь состоит в повышении его рыбопродуктивности и рекреационная деятельность. Однако следует сказать, что развитие курортов, увеличение числа отдыхающих и туристов создают угрозу сохранения мезотрофного уровня системы озера. Данные многолетних исследований свидетельствуют, с одной стороны, об устойчивости Нарочанской экологической системы к антропогенному воздействию, а с другой – о некоторых признаках антропогенного эвтрофирования. Распашка земель, мелиорация заболоченных площадей, расширение населенных пунктов оказывает антропогенное влияние на озеро [2 – 5].

Целью настоящей работы является моделирование возможных колебаний средних годовых уровней воды озера.

### **Методика расчета**

Если рассматривать колебания уровня озера в плоскости (приращение уровня), то исключается явная зависимость колебаний уровня от времени, т. к. исходные данные на плоскости представляются множеством точек [6]. Для этого множества точек можно построить выборочную регрессию, показывающую меру разброса экспериментальных точек вокруг некоторой функции

$g(x)$ , называемой регрессией. Чаще всего мера разброса для непрерывной на заданном отрезке функции  $g(x)$  определяется формулой

$$Q(g) = \sum_{j=1}^n (y_j - g(x_j))^2, \quad (1)$$

где  $y_j$  – ордината;  $x_j$  – абсцисса экспериментальных наблюдений.

Теорема Вейерштрасса гласит, что любая непрерывная на конечном отрезке функция может быть приближена алгебраическим полиномом с любой заданной точностью, поэтому ее можно применять для анализа колебаний уровня воды с применением параметрической модели вида [6]:

$$\Delta H = \Phi(H) + \gamma(t), \quad (2)$$

где  $H$  – уровень водоема;  $\Delta H$  – его приращения;  $\gamma(t)$  – случайная возмущающая сила;  $\Phi(H)$  – алгебраический полином, называемый автономной (не зависящей от времени) регрессией.

В автономное уравнение или систему автономных уравнений явно не входит независимая переменная (время), что означает, что закон изменения неизвестных функций, описываемых автономным уравнением или системой автономных уравнений, не меняется с течением времени [8]. Для проведения расчетов и последующего моделирования исходные данные наблюдений нормируются с помощью преобразования:

$$Z(t) = \frac{2H(t) - H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}, \quad (3)$$

где  $Z(t)$  – нормированная величина уровня водоема;  $H(t)$  – исходный уровень в момент времени  $t = 1, \dots, N$ ;  $H_{\max} = \max_{1 \leq t \leq N} H(t)$  – максимальный уровень;  $H_{\min} = \min_{1 \leq t \leq N} H(t)$  – минимальный уровень водоема.

Метод построения параметрической регрессии основан на использовании следующей линейной относительно параметров дифференциально-разностной модели [1]:

$$Z(t+1) - Z(t) = \Phi(Z(t)) + \gamma^{(k)}(t), \quad (4)$$

где  $\gamma^{(k)}(t)$  – остаточная последовательность модели регрессии порядка  $k$ , а  $\Phi(Z(t))$  определяется из соотношения:

$$\Phi(Z(t)) = \sum_{i=0}^k a_i Z^i(t).$$

Будем предполагать, что эта последовательность имеет постоянное математическое ожидание и дисперсию, а ее значения некоррелированы. Оценки параметров  $a_i$  определяются из условия минимума функции  $Q$  методом наименьших квадратов:

$$Q(a_0, a_1, \dots, a_k) = \sum_{t=1}^{N-1} \left[ Z(t+1) - Z(t) - \sum_{i=0}^k a_i Z^i(t) \right]^2, \quad (5)$$

где  $k$  – степень полинома;  $N$  – число статистических данных наблюдений.

Функция  $Q(a_0, a_1, \dots, a_k)$  достигает минимума в точках, где производные по соответствующим переменным обращаются в ноль. Степень полинома  $k$  выбирается при условии стабилизации суммы квадратов остаточной последовательности.

При решении уравнения  $\Phi(Z(t)) = 0$  получают равновесные положения уровня для нормированных данных, а соответствующие им равновесные абсолютные положения уровня при рассмотрении производной в полученных точках означают устойчивое (знак “–”) или неустойчивое (знак “+”) состояние [8]. Для наглядности движения идеальной точки под действием случайной вынуждающей силы рассматривают потенциал

$$U(H) = - \int \Phi(H) dH. \quad (7)$$

Минимумы потенциала соответствуют устойчивым состояниям равновесия, а максимумы – неустойчивым.

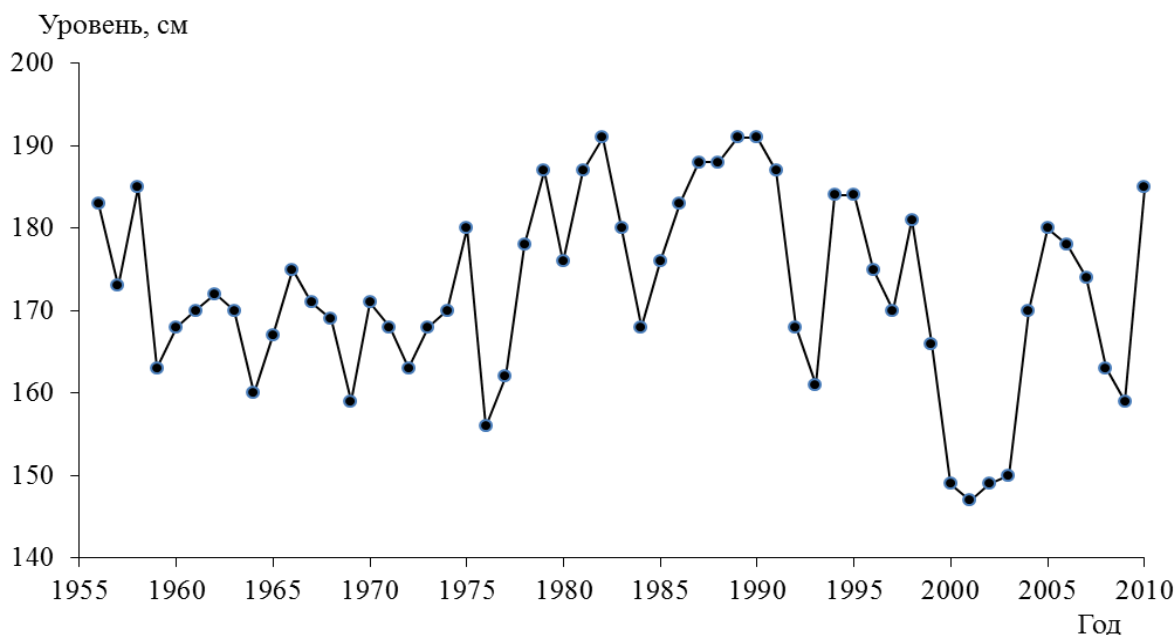
Для моделирования траектории исследуется остаточная последовательность. Если исследуемая функция  $Y(t)$  есть сумма периодической функции  $f_p(t)$  с периодом  $P_0$  и шума  $\varepsilon(t)$ , то при наложении отрезков ряда  $Y_k$  длиной  $P_0$  друг на друга выявляется вид периодической функции  $f_p(t)$ . Для этого необходимо свернуть временной ряд с периодом  $P_0$  и рассмотреть фазовую диаграмму этого периода. Фазовая диаграмма представляет собой зависимость  $Y_k$  от  $X_k$ , где абсцисса  $X_k$  определяется следующим выражением [9]:

$$X_k = fr\left(\frac{t_k - t_*}{P_0}\right), k = 1, \dots, N, \quad (8)$$

где  $fr(z)$  – дробная часть числа  $z$ ;  $t_k$  – моменты времени наблюдений;  $t_*$  – произвольно выбранный момент времени.

#### ***Исходные данные и результаты исследований***

В основу исследования положены материалы наблюдений за средними годовыми значениями уровней воды в озере Нарочь за 55-летний интервал – с 1956 по 2010 гг. Для проведения анализа имеющегося ряда данных наблюдений построен график колебаний уровня воды озера Нарочь на исследуемом интервале, изображенный на рис. 1. Для моделирования колебаний уровня во избежание ошибок при округлении в вычисления исходные данные были нормированы с помощью преобразования (3). При использовании для нормированных данных модели (4)–(5) были рассчитаны суммы квадратов остаточной последовательности  $\gamma^{(k)}(t)$  для степени полинома  $k$ , равной числам от 3 до 10 включительно.



*Рис. 1. Колебания уровня озера Нарочь, 1956 – 2010 гг.*

Полученные результаты свидетельствуют о стабилизации остаточной суммы квадратов нормированных данных при  $k=8$ , поэтому дальнейшего увеличения порядка регрессии не требуется (рис. 2).

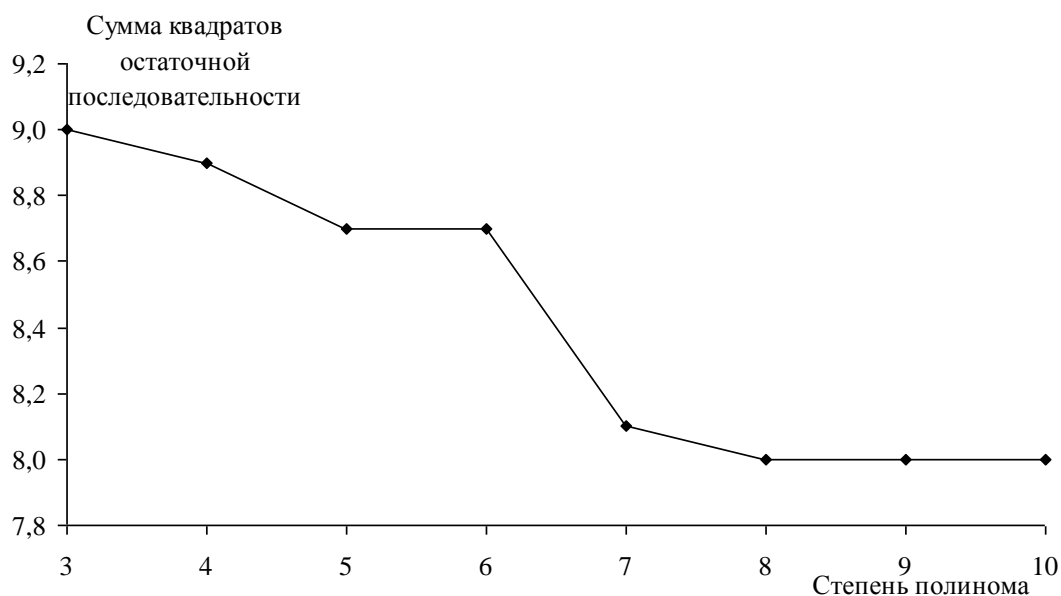


Рис. 2. Зависимость суммы квадратов остаточной последовательности от степени полинома

Далее методом наименьших квадратов была рассчитана функция  $\Phi(Z(t))$ , описывающая колебания нормированных данных наблюдений и представленная в виде полиномиальной регрессии 8-й степени:

$$\begin{aligned} \Phi(Z(t)) = & -9.8234Z^8(t) - 9.5248Z^7(t) + 20.3185Z^6(t) + 17.6399Z^5(t) - \\ & -13.8939Z^4(t) - 8.3926Z^3(t) + 3.3150Z^2(t) + 0.1504Z(t) - 0.0134. \end{aligned} \quad (9)$$

Равновесные положения уровня являются корнями уравнения  $\Phi(Z(t)) = 0$  и принимают для нормированных данных значения  $Z_1 = -0,082$ ,  $Z_2 = 0,049$ ,  $Z_3 = 0,349$ , что соответствует трем значениям уровня  $H_1 = 167,196$  м,  $H_2 = 170,069$  м,  $H_3 = 176,678$  м, являющихся положениями равновесия (рис. 3).

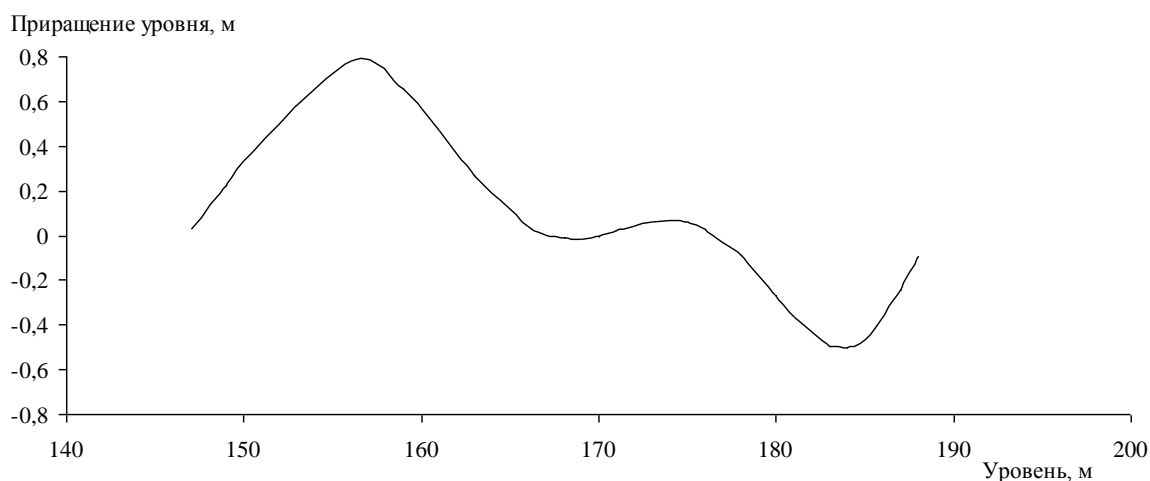


Рис. 3. Полиномиальная регрессия 8-го порядка в абсолютном масштабе.

Используя выражение (7), исследован потенциал уровня озера Нарочь (рис. 4). Точки экстремумов потенциала совпадают с корнями уравнения  $\Phi(Z(t)) = 0$ . При этом для озера Нарочь характерно два минимума  $H_1 = 167,196$  м,  $H_3 = 176,678$  м (устойчивые состояния равновесия) и один максимум  $H_2 = 170,069$  м (неустойчивый уровень).

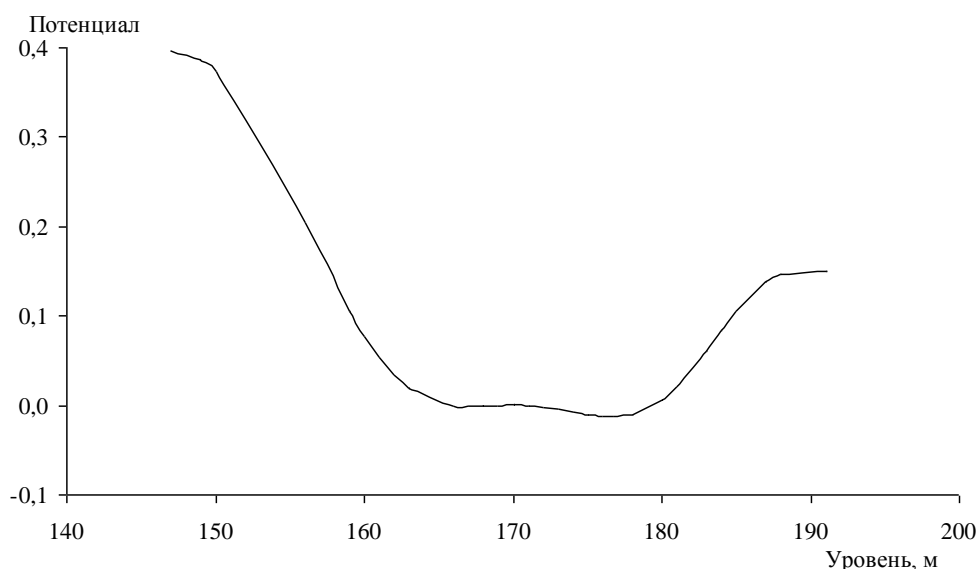


Рис. 4. Потенциал регрессии 8-го порядка.

Для моделирования траектории колебаний уровня была исследована остаточная последовательность. Период  $P_0$  остаточной последовательности определен с применением спектрально-временного анализа, в основу которого положено вычисление спектров вариации на скользящих временных отрезках [7]. Для уровня озера Нарочь выявлен 2-летний цикл, что положено в основу построения фазовой диаграммы на основании соотношения (8), изображенной на рис. 5.

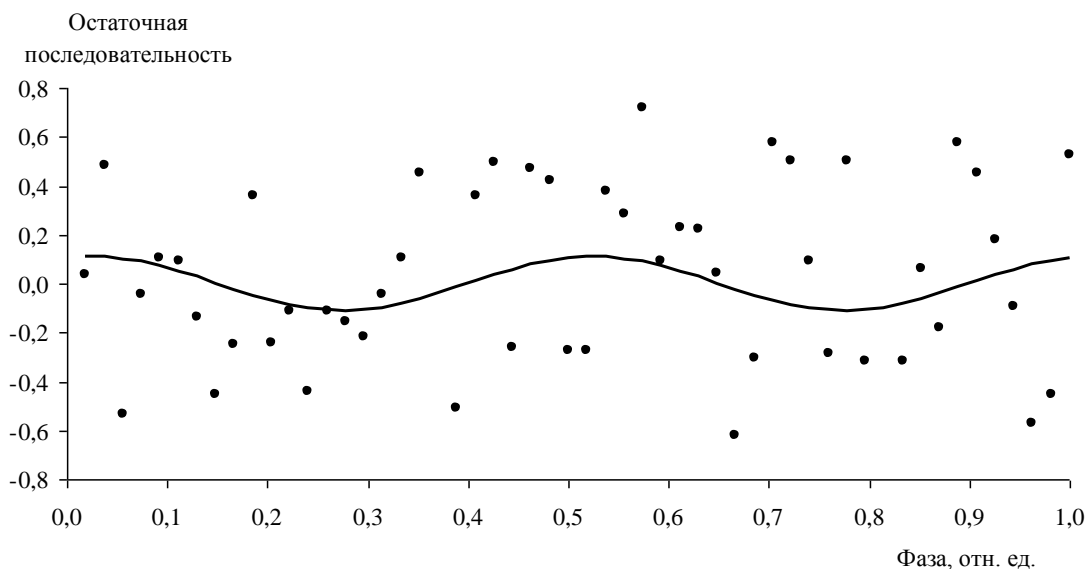


Рис. 5. Фазовая диаграмма остаточной последовательности.

Предположим, что фазовая диаграмма остаточной последовательности имеет характерную для сезонных колебаний синусоидальную форму, тогда ее можно представить следующим образом:

$$\gamma^{(8)}(t) = A_0 + A_1 \sin 4\pi t + A_2 \cos 4\pi t + \varepsilon(t), \quad t = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где  $\varepsilon(t)$  – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин.

Значения неизвестных параметров выражения (10) получены методом наименьших квадратов и имеют следующие значения:  $A_0 = 0$ ,  $A_1 = 0,03418$ ,  $A_2 = 0,10471$ . После удаления из остаточной последовательности периодической составляющей рассчитаны параметры

последовательности  $\varepsilon(t)$ , имеющие следующие значения: математическое ожидание  $M_k = 0$  и стандартное отклонение  $\sqrt{D_k} = 0,3805$ . Для моделирования траектории колебаний уровня озера Нарочь выражение (9) преобразуется к следующему выражению:

$$\Phi(Z(t)) = -9.8234Z^8(t) - 9.5248Z^7(t) + 20.3185Z^6(t) + 17.6399Z^5(t) - 13.8939Z^4(t) - 8.3926Z^3(t) + 3.3150Z^2(t) + 1.1504Z(t) - 0.0134 + A_0 + A_1 \sin 4\pi t + A_2 \cos 4\pi t + \varepsilon(t), \quad (11)$$

где  $\varepsilon(t)$  – остаточная последовательность, имеющая нормальное распределение с параметрами  $N(0; 0,3805)$ .

На рис. 6 представлена траектория, смоделированная с помощью автономного дифференциально-разностного уравнения и периодической составляющей. Моделирование по формуле (11) траектории длиной 200 значений показало, что за пределы верхнего уровня, равного 191 м, выходят 2 значения, что составляет 1 %. Это позволяет говорить о том, что вероятность превышения максимального годового уровня озера Нарочь маловероятна.

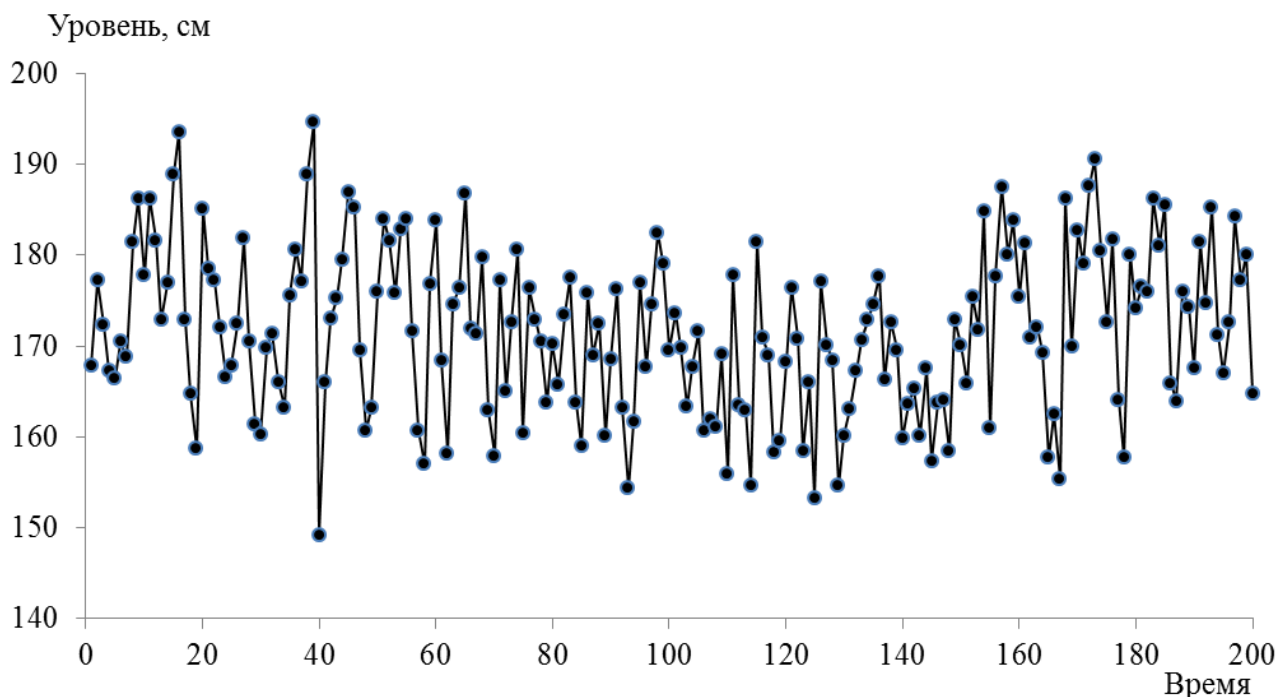


Рис. 6. Моделированная траектория колебаний уровня озера Нарочь.

### Заключение

В результате проведенных исследований колебаний уровня озера Нарочь исходные данные разложены на 3 составляющие: полиномиальную регрессию, позволяющую определить не зависящий от времени закон траектории, периодическую составляющую синусоидального характера и остаточную последовательность независимых случайных величин. Моделирование траектории колебаний основано на детерминированной части, состоящей из регрессии 8-го порядка и периодической составляющей, а также случайной части, состоящей из независимых одинаково распределенных величин.

С применением предложенной модели можно моделировать траектории колебаний уровня озера Нарочь. Смоделированная траектория длиной 200 значений продемонстрировала вероятность превышения максимального годового уровня, равную 1 %.

### Литература:

1. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Исследование зависимостей / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.

2. Блакітная кніга Беларусі: Энцыкл./ Беларус. Энцыкл.; Рэдкал.: Н. А. Дзісько і інш. – Мінск: БелЭн, 1994. – 415 с.
3. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёра, вадасховішчы, турысцкі патынцыял водных аб'ектаў / Маст.: Ю. А. Тарэеў, У. І. Цярэнцьеў – Мінск: БелЭн, 2007. – 480 с.
4. Водные ресурсы Национального парка «Нарочанский»: справочник / А. Г. Аронов [и др.]; под общей редакцией В. С. Люштыка, д-ра биол. наук Т. В. Жуковой. – Минск : РИФТУР ПРИНТ, 2012. – 128 с.
5. Иванов-Смоленский В.Г. Все озера Беларуси : справочник / В. Г. Иванов-Смоленский. – Минск: РИФТУР ПРИНТ, 2013. – 752 с.
6. Кожевникова И. А. Моделирование колебаний уровня озера Кинерет / И. А. Кожевникова, В. И. Швейкина // Водные ресурсы. – 2014. – Том 41, № 1. – С. 565–572.
7. Логинов В. Ф. Спектрально-временной анализ уровня озера и колебаний расходов воды крупных рек Беларуси / В. Ф. Логинов, В. Ф. Иконников // Природопользование: сб. научн. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии; под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. – Минск, 2003. – Вып. 9. – С. 25–33.
8. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – М.: Наука, 1965. – 331 с.
9. Теребиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике / В. Ю. Теребиж. – М.: Наука, 1992. – 389 с.

## **SIMULATION OF OSCILLATIONS IN AVERAGE ANNUAL WATER LEVELS OF LAKE NAROCH**

Alexander Volchak,  
Dr. Sc., dean of the engineering systems and ecology faculty  
Brest State Technical University,  
E-mail: [volchak@tut.by](mailto:volchak@tut.by)

Ivan Kirviel,  
Dr. Sc., professor  
Pomeranian Academy  
E-mail: [kirviel@yandex.by](mailto:kirviel@yandex.by)

Adam Choński,  
Dr. Sc., professor  
Institute of Physical Geography and Environmental Planning  
E-mail: [choinski@amu.edu.pl](mailto:choinski@amu.edu.pl)

Sergey Parfomuk,  
Ph. D., head of department of informatics and applied mathematics  
Brest State Technical University,  
E-mail: [parfom@mail.ru](mailto:parfom@mail.ru)

*Abstract:* Data on levels of Lake Naroch decomposed into 3 components: polynomial regression, sinusoidal periodic component and residual sequence of independent random values. Modeling of the trajectory oscillations was performed using deterministic part consisting of a regression of 8th order and a periodic part and random part consisting of independent identically distributed variables. Simulated trajectory with a length of 200 values showed the probability of exceeding the maximum annual level equal to 1 %.

*Keywords:* modeling, level, trajectory, oscillation, the lake Naroch

## УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ КРУПНЫХ ОЗЁР ЕВРОПЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Аркадий Михайлович Догановский  
д.г.н., профессор РГГМУ

E-mail: [doganovsky@bk.ru](mailto:doganovsky@bk.ru)

Екатерина Владимировна Давыденко  
аспирант РГГМУ

E-mail: [davydenko91@mail.ru](mailto:davydenko91@mail.ru)

*Аннотация:* Рассмотрены закономерности многолетних колебаний уровня крупных разнотипных озёр Европы. Выполнены оценки влияния климата и строения озёрных систем на режим уровней, меняющегося во времени и по территории.

*Ключевые слова:* климат, озёрная система, водообмен, спектральный и гармонический анализ, тренды, цикличность.

### Введение

Озера – водоемы замедленного водообмена распространены в Европе повсеместно. Среди огромного количества разнотипных озер большое значение приобретают крупные водоемы, вместе с водосборами (озерные системы) занимающие большие территории. Крупные озера это водные ресурсы и источники водоснабжения, регуляторы речного стока, водоприемники. Озера также являются объектами рыбного хозяйства, галургии, рекреации, часто судоходства и др. Эти объекты могут быть показателями процессов происходящих в их бассейнах. Важна роль крупных озер (особенно слабопроточных) как индикаторов изменений климата. Перечисленные процессы, их изменения определяются режимом колебаний уровня воды (режим наполнения озер). Поэтому основная задача исследования – определение структуры рядов годовых уровней воды озер, оценка причин определяющих колебания и распределение выявленных закономерностей по территории.

### Материалы, методы, результаты

Площадь Европы с прилегающим островами составляет 10,5 млн. км<sup>2</sup>. Климат континента умерено-континентальный, на западе – морской. Он сильно обусловлен Гольфстримом, который нагревает западную часть территории. Поэтому Европу можно разделить на две части: западную – морскую и восточную – континентальную, которые различаются температурным режимом и количеством осадков. Неодинаковы климатические условия на севере и на юго-востоке континента, относящихся к районам достаточного и недостаточного увлажнения. Количество атмосферных осадков определяется, в основном, западным переносом, активной циклонической деятельностью [5, 11].

Большую роль в формировании климата Европы играет, так называемое, Северо-Атлантическое колебание (САК) [4,6,8,9]. Основа САК заключается в перераспределении атмосферной влаги между Арктикой и Субтропической Атлантикой. При этом переход САК из одной фазы в другую вызывает изменения в динамике большинства крупномасштабных атмосферных процессов, что приводит к изменениям погоды и климата в атлантико-европейском районе, в первую очередь – в Центральной и Северной Европе. Для количественной оценки колебания принят индекс (I) предложенный в [3], здесь же представлен график его хронологического хода за последние 125 лет (рис.1). Одновременно, для сравнения, представлен индекс тихоокеанского колебания (СТК).



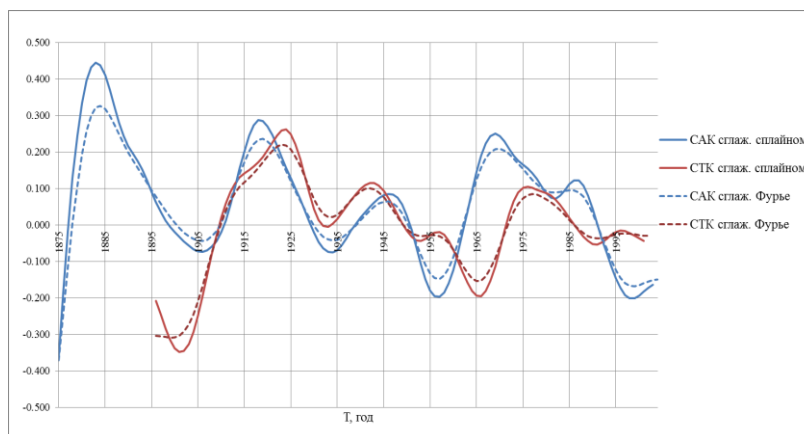


Рис. 1 Сглаженные с помощью кубического сплайна и простого преобразования Фурье ряды индексов САК и СТК.

Обращает на себя внимание отрицательный тренд и наличие серий лет повышенной и пониженной активности САК. При этом отмечено постепенное уменьшение амплитуды колебания первых трёх циклов и возрастание четвертого. Проведенный анализ сглаженных рядов индексов позволил выделить около 30-летние и слабовыраженные 11-летние флуктуации (Рис. 2).

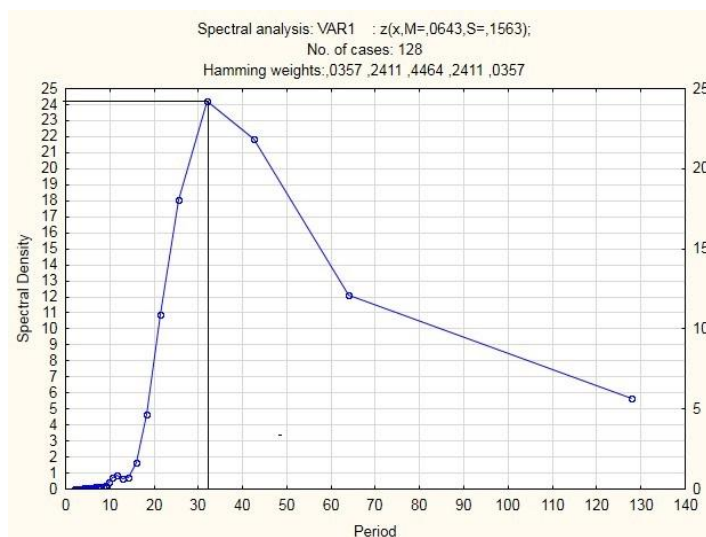


Рис. 2 Спектральная плотность индекса САК.

Изменение САК сопровождается изменением основных метеорологических характеристик, входящих в водный баланс озёр. Это, прежде всего атмосферные осадки, испарение и речной сток. Рассмотрены так же другие известные климатические индексы, влияющие на уровенный режим озёр, например, индекс Де-Мартона и др. Следовательно влияние САК на уровенный режим озёр очевидно. Примеры влияния САК на уровенный режим озёр, увлажненность территорий имеются в [4,7,9,10].

Изменчивость составляющих водного баланса, как в годовом, так и в многолетнем разрезе является главной причиной колебаний уровня воды водоемов. Однако часто в одних и тех же климатических условиях уровенный режим разных озёр неодинаков и ряды уровней имеют различную структуру, т.е. ряды различаются размахом колебаний, продолжительностью периодов высокого и низкого стояния уровня (для многолетних рядов цикличностью, временем наступления экстремумов и др.). Различна и асимметричность рядов.

Помимо климатических факторов на структуру ряда оказывают влияние особенности строения озерных систем (величины удельных водосборов) и формирующаяся высокая автокоррелированность ( $r(I)$ ). При высоких значениях  $r(I)$  более четко проявляются низкочастотные колебания, формируются тренды.

Известно, что коэффициенты автокорреляции связаны с показателями интенсивности водообмена: [1,3]

$$r(1) = 1 - \frac{K_e}{\varphi}$$

где  $K_e$  – коэффициент водообмена;  $\varphi$  – эмпирический коэффициент, зависящий от особенностей строения озерной системы.

Материалом для исследований послужили данные многолетних наблюдений за уровнем воды озер с наиболее длинными рядами наблюдений, распространенных преимущественно в Центральной и Северной Европе, имеющих большое хозяйственное и природоохранное значение. Характеристики большинства исследуемых озер представлены в таблице 1. Все эти объекты имеют разнообразные индивидуальные особенности (площади водной поверхности и бассейна, объем воды, внешний водообмен и т.п.).

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики исследуемых озер

№ п/п	Название озера	Страна	Площадь озера, км <sup>2</sup>	Макс. Глуб.м.	Длина ряда, лет
1	Пакоски	Польша			70
2	Вайнавеси	Финляндия	100	8	92
3	Пяйянне	Финляндия	1065	93	102
4	Оулуярви	Финляндия	928	38	147
5	Гопло	Польша			85
6	Лача	Россия	356	5	93
7	Ладожское	Россия	17872	230	121
8	Женевское	Швейцария	582	310	136
9	Селигер	Россия	260	24	97
10	Сайма	Финляндия	4380	84	133
11	Онежское	Россия	9720	127	130
12	Чудское	Россия, Эстония	2613	12,9	117
13	Кубенское	Россия	648	13	109
14	Нигочин	Польша	26	39	167
15	Пулозеро	Россия	50	15,0	83
16	Меларен	Швеция	1140	61	164
17	Венерн	Швеция	5650	106	78

На основании этих данных была проведена проверка рядов на однородность, стационарность, а так же определены параметры кривых обеспеченности (таблица 2).

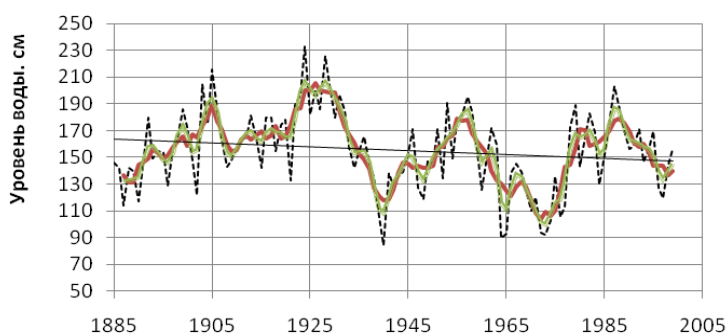
Исследование рядов на однородность позволило установить возможное влияние на уровенный режим антропогенных факторов (Онежское, Меларен и др.). Установлено, что на большинстве озёр наблюдаются, как правило, отрицательные тренды, соответствующие условиям потепления климата.

Результаты статистической обработки рядов уровней

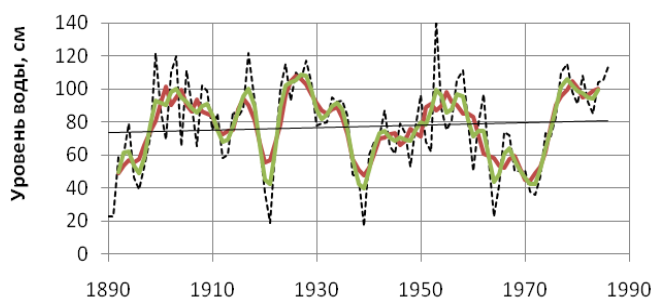
№ п/п	Название озера	Страна	Длина ряда	СКО	Cs	r(1)
1	Чудское	Россия, Эстония	117	29,42	-0,03	0,59
2	Нигочин	Польша	167	0,16	0,72	0,64
3	Оулуярви	Финляндия	147	32,32	-0,57	0,61
4	Сайма	Финляндия	133	38,76	0,11	0,44
5	Онежское	Россия	130	50,89	-0,46	0,69
6	Меларен	Швеция	164	13,67	0,50	0,45
7	Лача	Россия	93	13,24	0,56	0,28
8	Венерн	Швеция	78	33,26	-1,87	0,85
9	Селигер	Россия	97	26,32	0,18	0,56
10	Женевское	Швейцария	136	18,75	-0,55	0,66
11	Ладожское	Россия	121	55,33	-0,19	0,76
12	Вайнаявеси	Финляндия	92	20,22	0,21	0,46
13	Пяйянне	Финляндия	102	22,47	0,025	0,47
14	Пулозеро	Россия	83	8,99	0,92	0,66

Из таблицы следует, что все значения озерных  $r(1)$  значительно выше этих же величин для составляющих водного баланса.

Уровеньный режим озёр представляет собой сложный полициклический процесс, состоящий из разночастотных колебаний. Для выявления структуры ряда использовались известные методы фильтрации рядов (анализ Фурье, метод скользящего пятилетнего среднего, биномиальный фильтр) (рис. 3).



Годы (а)



Годы (б)

Рис. 3. График колебаний уровней сглаженных методами скользящего пятилетнего среднего и биномиальным фильтром оз. Чудское(а), оз. Селигер(б).

Анализ рядов позволил выявить некоторые закономерности колебаний уровней: наличие трендов, разночастотных циклических колебаний и случайных составляющих (шум).

Для оценки структуры рядов был выполнен спектральный анализ, который подтвердил для всех рассматриваемых озёр доминирование около 30-летних колебаний, вклад которых в общую дисперсию процесса возрастает по мере увеличения  $r(l)$ . В качестве примера на рисунке 4 представлены спектры для озёр Сайма и Чудское.

Обращает на себя внимание преобладание более короткопериодных флуктуаций на ряде объектов (Сайма, Пяйянне, Вайнавеси и др.) над 30-летними. Такое соотношение характерно для озёр, расположенных в северных областях Европы.

Таким образом анализ изменения во времени индексов САК и озёрных уровней показал их взаимозависимость (наличие трендов, 11-летние и 30-летние колебания).

Для количественной оценки взаимодействия климата (индексы САК) и уровней озёр представлена взаимная корреляционная функция сглаженных рядов САК и уровней Ладожского озера [3].

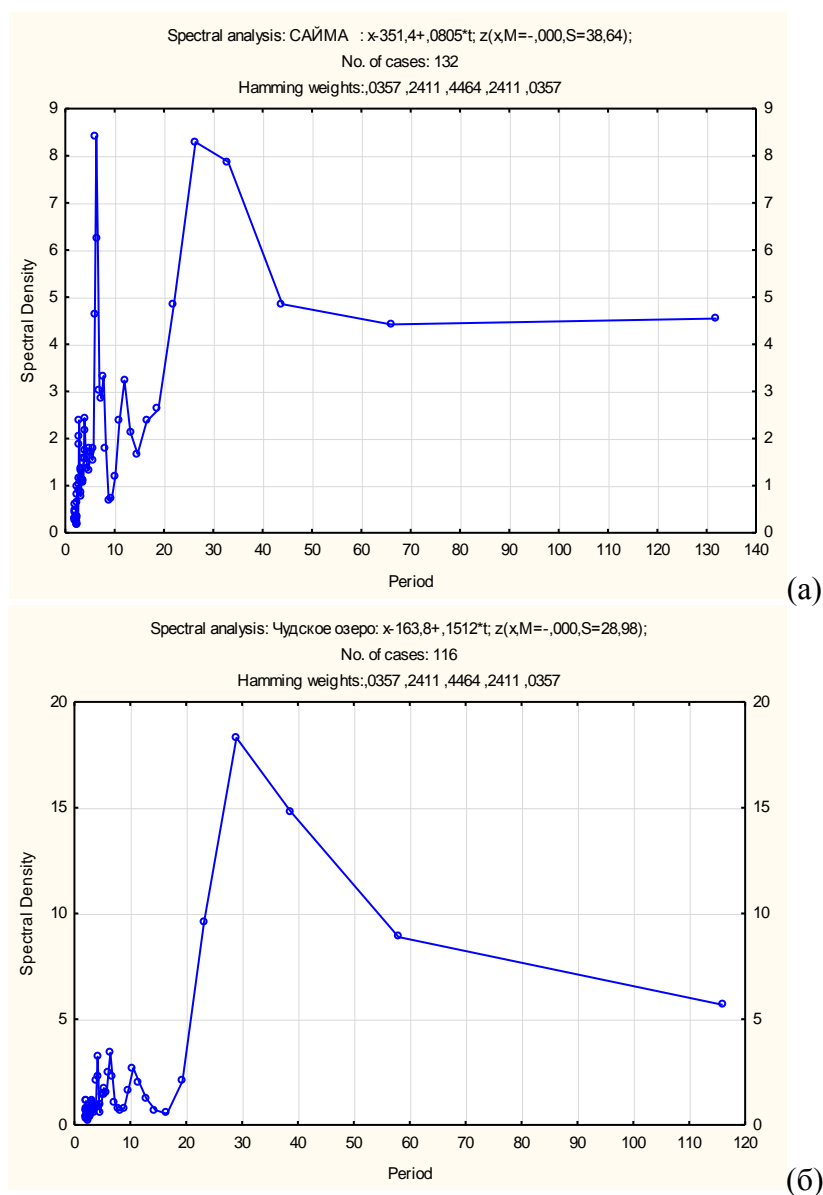


Рис. 4 Спектральная плотность многолетних уровней воды оз. Сайма(а), оз. Чудское(б).

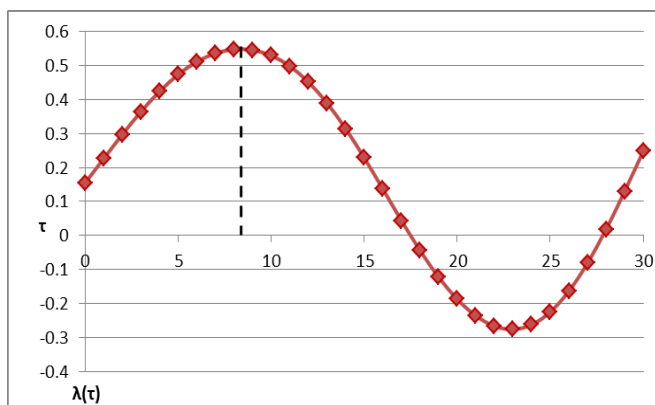


Рис. 5 Взаимная корреляционная функция САК – Ладожское озеро.

Подобные зависимости построены и для других озёр. Анализ совмещенных графиков сглаженных значений уровней показывает смещение переломных точек на графиках, ограничивающих выявленные циклы в зависимости от расстояния между объектами. Таким образом индексы САК являются фоном, отображающим влиянием климата на уровеньный режим озер.

#### Литература:

1. Багров Н. А. О колебаниях уровня бессточных водоемов. Метеорология и гидрология. – 1963. – № 6. – с. 41-48.
2. Догановский А. М. Гидросфера Земли. /В. Н. Малинин // СПб, Гидрометеиздат, - 2004, - 630с.
3. Догановский А. М. Противофазность колебаний увлажненности крупных территорий лесной зоны на северо–западе и востоке Евразии. / Н. В. Федосеева, М. Н. Лукина / Ученые записки РГГМУ, - 2015, - №38, - с. 9-20.
4. Малинин В. Н. Северо-атлантическое колебание и увлажнение европейской территории России / С.М. Гордеева/. Общество. Среда. Развитие. изд Астерион №2, -2014, – с.191-198.
5. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат,-1974, -640 с.
6. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание; атмосфера и океан. М.: Триада, лтд, - 2013, - 144 с.
7. Руховец Л. А. Влияние изменений климата на водные ресурсы больших озер. <http://refleader.ru>
8. Смирнов Н. П. Североатлантическое колебание и климат / В. Н. Воробьев, С. Д. Качанов / СПб. Изд. РГГМУ, -1998, -122 с.
9. Филатов Н. Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России /Л. А. Руховец, Л. Е. Назарова, Л. П. Георгиев, Т. В. Ефремова, Н. И. Пальшин / Ученые записки РГГМУ, - 2014, - №34, - с.48 – 55.
10. Филатов Н. Н. Изменение климата восточной Фенноскандии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск. Карельский научный центр. - 1997, -147с.
11. Черногаева Г. М. Водный баланс Европы. М. Изд. А.Н.СССР, 1971, 139с.
12. Doganovski A. M. Characteristic properties of the level regime of north European Lakes. //Y. A. Davidov, O. V. Rusakov / Abstracts of tht first international Ladoga symposium 1993, Universi tu of Yoensuu, – 1995, - с. 89 – 95.

## LEVEL MODE OF LARGEST LAKES OF EUROPE IN A CHANGING CLIMATE

Arkady M. Dogsnovsky  
Doctor of science in geography,  
professor Russian State Hydrometeorological University

E-mail: [doganovsky@bk.ru](mailto:doganovsky@bk.ru)

Yekaterina V. Davydenko  
PhD student, Russian State Hydrometeorological University

E-mail: [davydenko91@mail.ru](mailto:davydenko91@mail.ru)

*Abstract:* Regularities of many years of fluctuating water levels of large lakes of different types Europe have been considered. Climate impact assessment and the structure of lake systems on the level mode, changing over time and territory, were performed.

*Key words:* climate, lake system, water change, spectral and harmonic analysis, trend, cyclic recurrence

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОВ  
УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ В СИСТЕМЕ «АТМОСФЕРА-ВОДА»  
ПО АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД 2013 И 2016 Г.Г.**

Валентина Михайловна Домышева,  
к.г.н., старший научный сотрудник,  
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск  
E-mail: [hydrochem@lin.irk.ru](mailto:hydrochem@lin.irk.ru)

Дмитрий Александрович Пестунов,  
к.т.н., научный сотрудник,  
Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск  
E-mail: [pest@iao.ru](mailto:pest@iao.ru)

Вячеслав Геннадьевич Иванов,  
к.г.н., научный сотрудник  
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск  
E-mail: [vigo@lin.irk.ru](mailto:vigo@lin.irk.ru)

Мария Владимировна Сакирко,  
к.г.н., научный сотрудник  
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск  
E-mail: [hydrochem@lin.irk.ru](mailto:hydrochem@lin.irk.ru)

Артем Михайлович Шамрин,  
аспирант,  
Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск  
E-mail: [shamrin.ar@yandex.ru](mailto:shamrin.ar@yandex.ru)

Михаил Васильевич Панченко,  
д.ф.-м.н., профессор, зам.директора,  
Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск  
E-mail: [pmv@iao.ru](mailto:pmv@iao.ru)

*Аннотация:* В работе обсуждаются результаты сравнения пространственной картины направления потоков в системе «вода-атмосфера» углеродсодержащих газов-  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ », по акватории оз. Байкал для двух кругобайкальских экспедиций 2013 и 2016 г.г.

*Ключевые слова:* углекислый газ, метан, парциальное давление, поток, Байкал

Изучению источников и стоков углекислого газа и метана в настоящее время уделяется особое внимание, поскольку наблюдающийся тренд роста их концентрации в атмосфере считается одним из важных факторов изменения климата [1]. Учитывая уникальность экосистемы озера Байкал, исследование потоков углеродсодержащих газов здесь имеет не только климатическую значимость, но и особое важно для понимания цикла углерода в экосистеме озера в целом [2,3]. Работа является продолжением комплексного изучения влияния физических, гидрологических, химических и биологических процессов на газообмен  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в системе «вода-атмосфера» на озере Байкал [4].

В представленных ранее работах (см. напр.[4]), исходя из возможностей имеющейся аппаратуры, нами проводились измерения направления потоков углекислого газа только на ограниченном числе гидрологических станций. в воде. Создание мобильного комплекса для регистрации парциального давления  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере и поверхностной воде по ходу судна [6] позволило существенно расширить масштаб проводимых исследований и осуществить одновременные измерения направления потоков углекислого газа и метана по всей трассе прохода НИС по акватории Байкала. Наиболее интересным временем для организации исследований



представляется период после схода ледового покрова, когда постепенно с юга на север начинается прогрев озера. Следовательно, за ограниченную по времени экспедицию появляется возможность провести измерения в почти летних, весенних и зимних условиях, соответственно, в южной, средней и северной части Байкала.

Обсуждаемые результаты были получены во время судовых измерений, проведенных по акватории Байкала, с 29 мая по 8 июня 2013 года и в 2016 г. с 25 мая по 6 июня.

Известно, что на формировании гидрологических и биологических процессов в воде Байкала весной сильно влияет погодная ситуация в регионе в холодный период года, которая определяет сроки начала таяния и освобождения озера ото льда. В свою очередь предыстория погодной ситуации, времени схода ледового покрова неизбежно сказывается на термическом и гидрологическом режиме, а так же определяет ритм жизнедеятельность гидробионтов.

Как видим рис. 1а, в 2013 г. за 28 дней до начала рейса вся акватория Байкала была покрыта льдом, а в начале рейса в северной котловине еще наблюдались отдельные фрагменты ледовых полей. Рейс 2016 г. (рис. 1б) проходил в условиях, когда уже за 20 дней только в северной котловине наблюдался ледовый покров, но уже за 2 дня до начала экспедиции вся поверхность озера была полностью свободна ото льда.

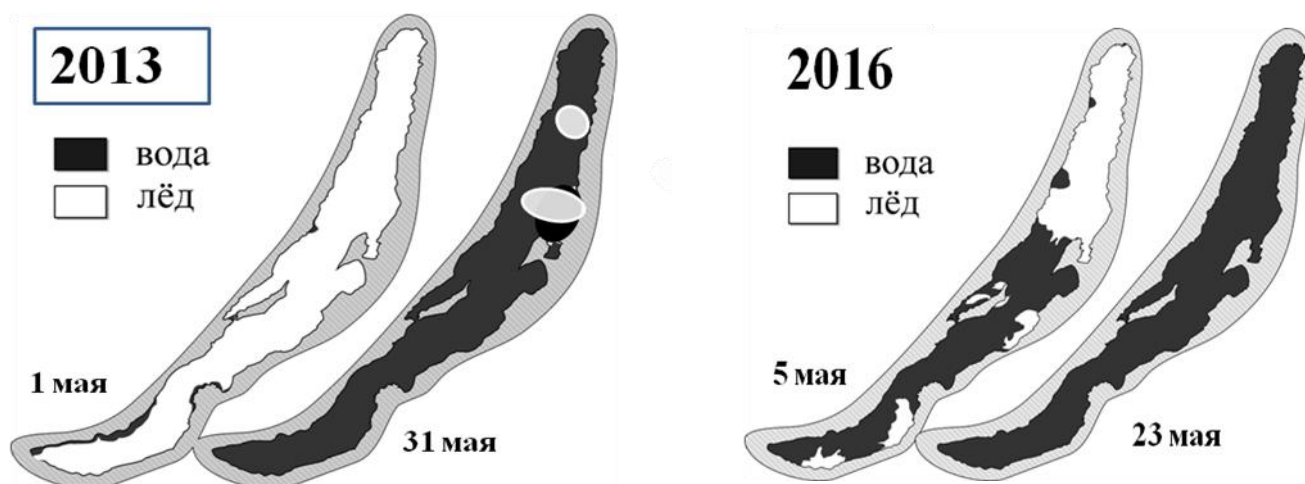


Рис. 1. Временная динамика схода ледового покрова в весенний период 2013 и 2016 гг. (по данным с сайта Бюллетень космического мониторинга Байкальской природной территории <http://geol.irk.ru/dzz/bpt/ice/ice201205.htm>. Мониторинг ледовой обстановки, температуры поверхности, облачного и снежного покровов).

Для описания пространственной картины направления потоков углекислого газа и метана, как и в предыдущих работах, будем использовать значения разности парциальных давлений между водой и атмосферой, которые определяют **направление и амплитуду** потока  $\Delta P = (P_v - P_a)$ , где  $P_v$ ,  $P_a$  – парциальные давления газа в поверхностной воде и в приводной атмосфере [5].

**Углекислый газ.** На рис. 2 представлены результаты измерений распределения разности парциального давления углекислого газа  $\Delta P_{CO_2}$  по всей трассе прохода судна в 2013 и 2016 г.г.



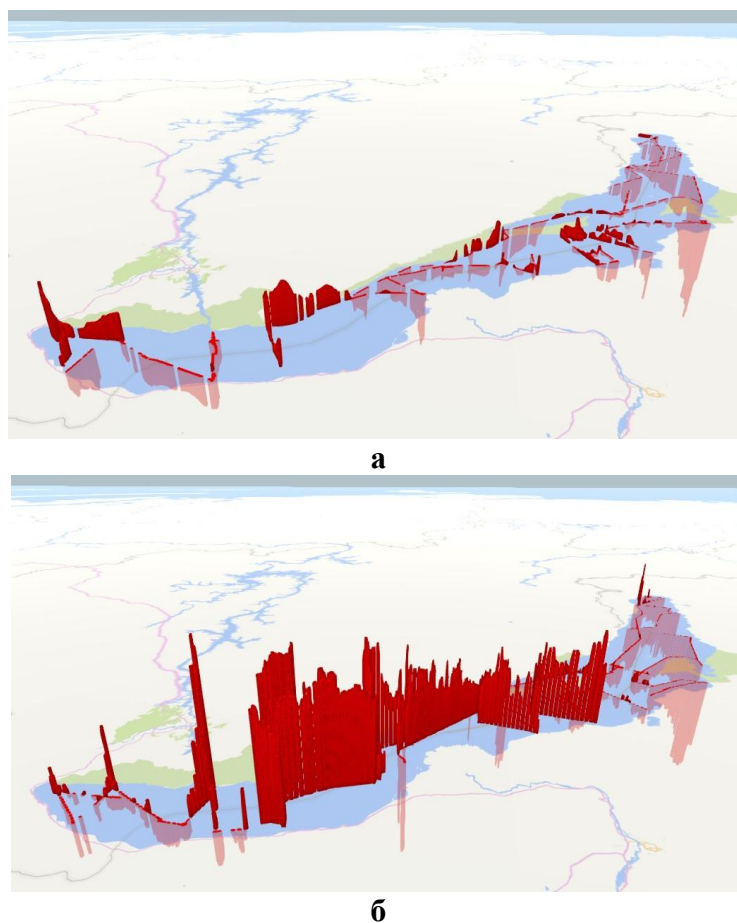


Рис. 2. Пространственное распределение разности парциального давления углекислого газа  $\Delta P = (P_b - P_a)$ . а-2013 г.; б-2016.

Как видим, основные различия между  $\Delta P_{CO_2}$  в двух экспедициях наблюдались, главным образом, в прибрежных районах Среднего Байкала, где в 2016 г. по сравнению с весной 2013 года поток углекислого газа был направлен с водной поверхности в атмосферу.

В тоже время сравнение данных, полученных на глубоководных гидрологических станциях в пелагиали (см. [7]), показывает, что на большинстве станций и в 2013 и 2016 г.г. наблюдается отрицательное значение  $\Delta P_{CO_2}$  (сток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность). В 12 км от Култука (ст.1) значение  $\Delta P_{CO_2}$  положительно, а в экспедициях 2013 и 2016 года различается только по величине. И только на 8 станции в центре разреза «Ольхонские ворота - п. Боладаково» можно отметить заметное различие не только в величине  $\Delta P_{CO_2}$ , но и знаке (2013 год - отрицательное значение, а 2016 - положительное). В целом данные 2013 и 2016 года в пелагиали оз.Байкал вполне соответствуют ранее полученным результатам и укладываются в рамки наблюдаемой в весенний период межгодовой изменчивости направления потока углекислого газа в системе «вода-атмосфера». А наиболее сильные различия  $\Delta P_{CO_2}$ , между двумя массивами данных, наблюдаемые в основном в Среднем Байкале, по-видимому связаны с различием гидрологических процессов, обусловленных разной динамикой схода ледового покрова в 2013 и 2016 г.г.

**Метан.** На рис. 4 представлены результаты измерения распределения разности парциального давления углекислого газа  $\Delta P_{CH_4}$ . Как видим, пространственная картина распределения направления потоков метана (по всему маршруту поток  $CH_4$  направлен в атмосферу), зарегистрированная в 2013 году, достаточно хорошо воспроизводится и в измерениях 2016 года (отметим только некоторые различия в амплитуде величины  $\Delta P_{CH_4}$ ). Подчеркнем, что в рассматриваемых двух циклах измерений наиболее высокое содержание метана в воде Байкала

наблюдалось вблизи берегов, и в первую очередь около выхода рек. Отсюда следует, что именно речной вынос растворенного газа во многом определяет картину пространственного формирования содержания метана в поверхностной воде Байкала.

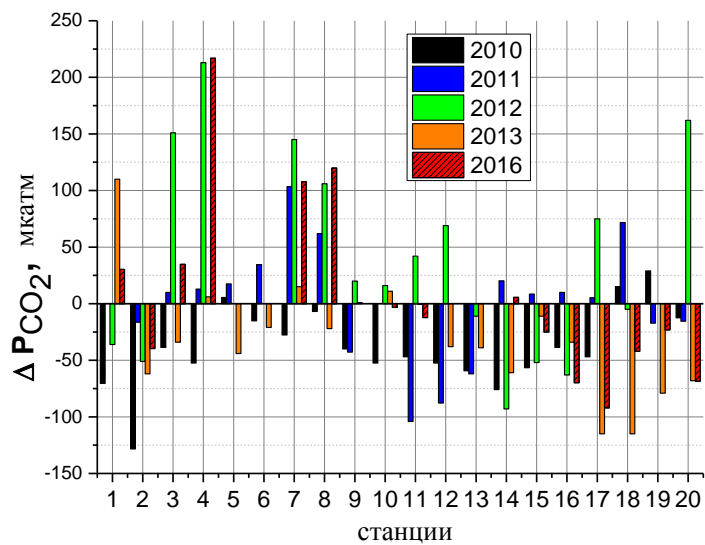
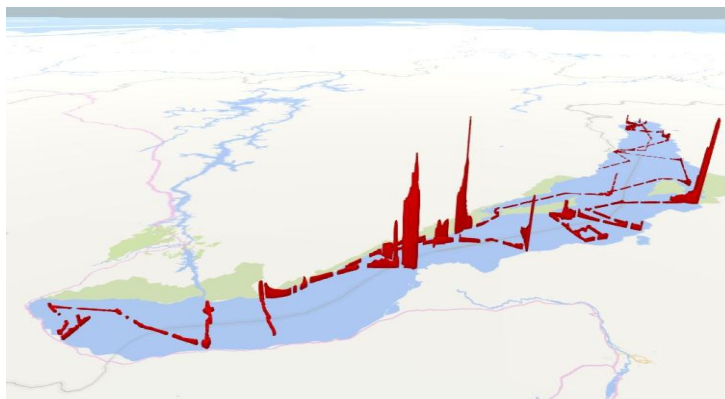


Рис. 3. Пространственное распределение разности парциального давления «вода-атмосфера»  $\Delta P_{CO_2}$  на гидрологических станциях Байкала (2010-2012, 2013 и 2016 гг.).



а



б

Рис. 4. Пространственное распределение разности парциального давления метана  $\Delta P=(P_g-P_a)$  ). а-2013 г.; б-2016.

### Заключение

Результаты измерений показали, что сравнение пространственного распределения разности парциальных давлений углекислого газа между водной поверхностью и атмосферой в рассматриваемых двух кругобайкальских экспедициях 2013 и 2016 г.г. вполне соответствует ранее проведенным исследованиям и укладывается в рамки имеющихся сведений о межгодовой изменчивости этой величины в весенний период.

Анализ пространственного распределения метана в приводном слое атмосферы и поверхностной воде на поперечных разрезах, результаты картирования вблизи береговой зоны и непосредственно в устьях рек на наш взгляд подтверждают вывод о преимущественном влиянии вод прибрежной зоны и, в особенности, речных выносов растворенного  $\text{CH}_4$  на его содержание в верхнем слое по всей акватории Байкала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00277а), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 10 и экспедиционных грантов СО РАН.

### Литература:

1. Bakker D. C. E., Bange Hermann W., Gruber Nicolas, Johannessen Truls, Upstill-Goddard Rob C., Borges Alberto V., Delille Bruno, Löscher Carolin, Naqvi S. Wajih A., Omar Abdirahman M. and Santana-Casiano J. Magdalena. *Air-sea interactions of natural long-lived greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) in a changing climate*// Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles , ed. by Liss, P. and Johnson, M. T.. Springer Earth System Sciences . Springer, Berlin, Germany, (2014) pp. 113-169. ISBN 978-3-642-25642-4 DOI [10.1007/978-3-642-25643-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25643-1_3).
2. Вотинцев К. К. Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР. 1961. –310 с. Вотинцев К. К., Мещерякова А. И., Поповская Г. И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск.: Наука, 1975.- 189 с.
3. Намсараев Б. Б., Дулов Л. Е., Соколова Е. Н., Земская Т. И. Бактериальное образование метана в донных осадках озера Байкал. // Микробиология; 1995; 64(3):411-417.
4. Valentina Domysheva, Mikhail Panchenko, Dmitry Pestunov, Mariya Sakirko. Air-Water Carbon Dioxide Exchange in the Littoral Zone of Lake Baikal (Ice-Free Period) //International Journal of Geosciences 2013.v4.N10.p.1339-1345 DOI: [10.4236/ijg.2013.410130](https://doi.org/10.4236/ijg.2013.410130)
5. Домышева В. М., Усольцева М. В., Сакирко М. В., Пестунов Д. А., Шимараев М. Н., Поповская Г. И., Панченко М. В. Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 06. С. 539–545.
6. Мобильный комплекс для исследования пространственного распределения потоков газов в системе "атмосфера - вода": патент №149753. Пестунов Д. А., Панченко М. В., Шамрин А. М.; заявлен 24.06.14
7. Сакирко М. В., Домышева В. М., Белых О. И., Помазкина Г. В., Шимараев М. Н., Панченко М. В. К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на озере Байкал. // Оптика атмосферы и океана. 2009. т. 22. № 6. С. 596-699.

**THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DIRECTION OF FLUXES OF  
CARBON-CONTAINING GASES IN THE SYSTEM "ATMOSPHERE-WATER" BY  
THE WATERS OF LAKE BAIKAL IN THE SPRING OF 2013 AND 2016 Y.Y.**

Valentina Domysheva,  
Ph.D., Senior Research Fellow,  
Limnological Institute of SB RAS, Irkutsk  
E-mail: hydrochem@lin.irk.ru

Dmitry Pestunov,  
Ph.D., research assistant,  
V.E.Zuev Institute of Atmospheric Optics. SB RAS,  
Tomsk  
E-mail: pest@iao.ru

Vyacheslav Ivanov, G.,  
Ph.D., Research Associate  
Limnological Institute of SB RAS, Irkutsk  
E-mail: vigo@lin.irk.ru

Maria Sakirko,  
Ph.D., Research Associate  
Limnological Institute of SB RAS, Irkutsk  
E-mail: hydrochem@lin.irk.ru

Artem Shamrin,  
graduate student,  
V.E.Zuev Institute of Atmospheric Optics. SB RAS,  
Tomsk  
E-mail: [shamrin.ar@yandex.ru](mailto:shamrin.ar@yandex.ru)

8. Mikhail Panchenko,  
Professor, Deputy Director,  
V.E.Zuev Institute of Atmospheric Optics. SB RAS,  
Tomsk  
E-mail: [pmv@iao.ru](mailto:pmv@iao.ru)

*Abstract:* The paper discusses the results of a comparison of the spatial distribution of the direction of flux in the system "water-atmosphere" carbon-containing gases-CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the waters of the lake. Baikal for two expeditions in the spring of 2013 and 2016 y.y..

*Keywords:* Carbon dioxide, methane, partial pressure, flux, Baikal

## ОЗЕРО СЕЛИГЕР КАК КРУПНЕЙШИЙ ВОДОЕМ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

Валентина Гавриловна Драбкова,  
д.б.н., проф., главный научный сотрудник ИНОЗ РАН  
e-mail: [drabkova@limno.org.ru](mailto:drabkova@limno.org.ru)

Анна Владиленовна Измайлова,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИНОЗ РАН  
Николай Аркадьевич Нестеров,  
д.т.н., проф., зав. лаб. Географии и природопользования ИНОЗ РАН

*Аннотация:* Оз. Селигер является самым крупным водоемом Тверской области, содержащим более  $\frac{1}{4}$  от суммарного запаса ее озерных вод. Изучение озера было начато еще в XIX в., но особенный интерес к нему стал проявляться по мере его загрязнения, связанного с усилением хозяйственной деятельности на водосборе. Последние комплексные работы на озере были проведены на рубеже XX-XXI вв. В настоящее время встает вопрос о новых исследованиях.

*Ключевые слова:* комплексные исследования, экологическое состояние озера, эвтрофирование, токсическое загрязнение

Тверская область расположена в центре Восточно-Европейской (Русской) равнины. Согласно последним оценкам, проведенным в Институте озероведения РАН в рамках определения водных ресурсов озер Российской Федерации [8], в пределах Тверской области расположено более 3500 водоемов различного генезиса и размера, при этом доля естественных водоемов составляет около 90% от этой величины. Озер - естественных водоемов площадью более 1 га, в области около 1750; 411 из них превышают по площади зеркала 20 га, и 125 имеют площадь более 1 км<sup>2</sup>. Среди искусственных водоемов распространены пруды, водохранилища и котлованы. В области 6 относительно крупных водохранилищ, в том числе 4 на р. Волга - Ивановское, Угличское (часть), Рыбинское (часть) и Верхневолжское; одно на р. Вазуза - Вазузское (часть) и одно на р. Цна - Вышневолоцкое. Суммарная площадь водной поверхности озер, расположенных в пределах области, составляет 1150 км<sup>2</sup>, а искусственных водоемов – 692 км<sup>2</sup>. Объем вод, содержащихся в озерах Тверской области, оценивается в 4.61 км<sup>3</sup>, а заключенных в искусственные резервуары – 2.76 км<sup>3</sup>. На рисунке 1 представлено распределение озерных водных ресурсов Тверской области в зависимости от генезиса и размера котловин.

Необходимо отметить, что среди 18 субъектов федерации, входящих в состав Центрального федерального округа, Тверская область характеризуется наибольшими озерными ресурсами. Из 6.6 км<sup>3</sup> воды, содержащейся во всех озерах округа, на ее долю приходится около 70%. Столь высокий запас озерных вод объясняется тем, что в пределах Центрального федерального округа Тверская область была практически единственной, на территорию которой распространялось последнее четвертичное оледенение. Его граница огибала ее западную и северо-западную части, в озерах которых и сконцентрирован основной запас вод. Большинство водоемов, сохранившихся как наследие последнего оледенения, характеризуются малыми и средними размерами, единственным большим озером является оз. Селигер. В пределах Тверской области расположены основные его плесы. Объем заключенной в озеро воды составляет 1.3 км<sup>3</sup> - более четверти от общего запаса воды во всех озерах Тверской области. Озеро входит в состав Верхневолжской водной системы, обеспечивающей более 75% водоснабжения Московской агломерации. По вместимости воды оз. Селигер превосходит Верхневолжское водохранилище в 1.64 раза. При таком объеме водных ресурсов озеро является важным источником и резервом надежного обеспечения высококачественной водой населения и отраслей хозяйства всего Верхневолжского бассейна. Особенно заметно повышается доля стока гидрологической системы оз. Селигер в экстремально маловодные годы, когда в створе р. Волга - с. Ельцы его вклад достигает 60-65%, а в створе р. Волга-г. Тверь его доля превышает 20% [20].

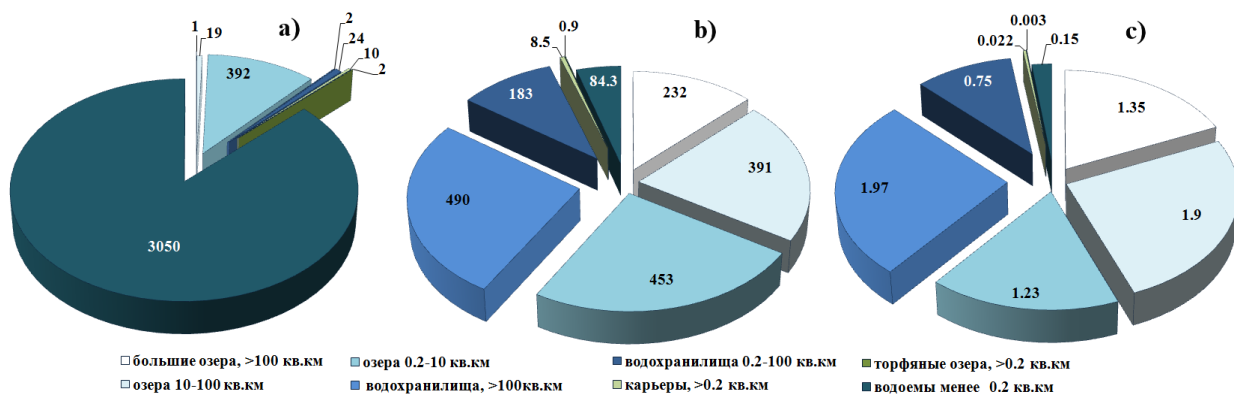


Рис. 1. Распределение озерных водных ресурсов Тверской области в зависимости от размера котловин: а) – количество водоемов, б) – площади водной поверхности, с) – объемы воды.

### Лимнологическая изученность оз. Селигер

Оз. Селигер издавна привлекало к себе внимание. Его целенаправленные исследования были начаты еще при Петре I, когда была поставлена задача - выявить возможности создания водного пути от верховьев Волги к Балтийскому морю. Предпосылкой к этому было выгодное географическое положение озера, находившееся на важном торговом пути между Петербургом, Новгородом и Тверью, Москвой. Потребность в водном пути отпала лишь после пуска Николаевской железной дороги.

Первые научные изыскания на оз. Селигер были проведены уже в начале XIX в., во время организованной академиком Н.Я. Озерцовским экспедиции 1814 г., направленной к истокам Волги. В своей книге «Путешествие на озеро Селигер» Н.Я. Озерцовский отметил наличие в нем «превеликих стад рыб».

Подробное комплексное изучение района Верхней Волги было проведено в 1890-1895 гг. под руководством Д.Н. Анучина [1]. Эта экспедиция положила начало изучению термического режима оз. Селигер, истории его развития. Впервые были составлены батиметрическая карта водоема и гипсометрическая карта его водосбора.

Большой вклад в изучение оз. Селигер внесла Бородинская пресноводная биологическая станция Императорского С.-Петербургского общества естествоиспытателей, организованная на рубеже XIX - XX вв. на его западном берегу. Сотрудниками станции были впервые составлены списки водорослей, простейших, беспозвоночных, водных растений. Все эти материалы приводятся в «Трудах Пресноводной биологической станции Императорского С.-Петербургского общества естествоиспытателей» [17]. Энтузиазм и творческая активность сотрудников станции привлекали сюда студентов и сотрудников Московского и С.-Петербургского университетов, а также других научных организаций России. Летом 1916 г. вблизи станции наблюдения над температурной стратификацией воды в озере и влиянием ветровой деятельности на положение «температурного скачка» проводил Л.А. Молчанов. Эта пионерская работа имела большую ценность не только для понимания температурного режима оз. Селигер, но и для лимнологии в целом.

С 1918 по 1923 гг. по инициативе химика Н.И. Демидова проводилось изучение сапропелевых отложений, обнаруженных в заливах оз. Селигер, а также в озерах и болотах близлежащих территорий. Исследования показали промышленные перспективы этого химического сырья. С 1924 г. были начаты первые исследования загрязнения оз. Селигер, связанного со сбросами кожевенного завода, существовавшего на территории г. Осташкова с начала XIX века. В донных отложениях Емшинского залива было зафиксировано наличие большого количества твердых отходов [12], однако существенных последствий для экосистемы озера выявлено не было.

В 1932-1933 гг. на оз. Селигер работала экспедиция Лаборатории гидробиологии Московского государственного университета, основной целью которой было рыбохозяйственное



обследование озера. Впервые была определена его биологическая продуктивность, что позволило отнести оз. Селигер к продуктивным водоемам, а некоторые его районы - к высокопродуктивным [7].

После значительного перерыва дальнейшее исследование оз. Селигер началось в 1959 г., когда было создано Осташковское отделение ГосНИОРХ, основными задачами работы которого было изучение природных особенностей озера как среды обитания рыб, а также оценка состояния его рыбных запасов и рыбного хозяйства. Наиболее продуктивными в изучении озера оказались 1960-е гг. Помимо Осташковского отделения ГосНИОРХ, просуществовавшего в г. Осташкове менее десяти лет, на озере в этот период работала экспедиция Института географии АН СССР под руководством Л.Л. Россолимо. Экспедиция изучала причины и условия возникновения устойчивых необратимых изменений режима озера под влиянием антропогенного фактора. Таким образом, оз. Селигер оказалось в числе первых водоемов, на которых начали изучать процессы антропогенного эвтрофирования. Было показано, что процессы антропогенного эвтрофирования происходят неравномерно в отдельных плесах, более интенсивно они развивались в той части озера, на которую непосредственно распространялось влияние сбросов кожевенного завода и города [14].

Дальнейшее усиление антропогенного воздействия на экосистему оз. Селигер способствовало организации новых научных экспедиций по исследованию состояния отдельных биологических сообществ [10, 13]. С 1980 г. Калининским политехническим институтом проводились систематические исследования качества вод, сбрасываемых с естественных и антропогенно нарушенных торфяных месторождений и болот. Были обследованы практически все мощные залежи сапропелей, на которых затем были проведены экспериментальные и производственные испытания технологий по их добыче.

В конце 1990-х гг. на озере были начаты комплексные совместные исследования Института озероведения РАН и Тверского Государственного технического университета, с 2000 г. к ним также присоединились специалисты Института географии РАН и Института океанологии и геоэкологии РАН. По результатам этих исследований были опубликованы монографии - В.И. Косова, И.В. Косовой «Экология озера Селигер» и «Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях». Эти работы позволили более полно охарактеризовать современное состояние экосистемы озера, его трофический статус, выявить антропогенные источники загрязнения. В работах дано геоэкологическое районирование территории водосбора по преобладающим видам антропогенных воздействий и по степени экологической опасности для водных ресурсов, разработаны рекомендации по первоочередным водо- и природоохранным мероприятиям.

#### ***Физико-географическая характеристика оз. Селигер.***

Озеро Селигер образовалось примерно 25 тысяч лет назад после окончания четверной ледниковой эпохи, и его следует рассматривать как реликт ледниковых озер и потоков талых вод. Современное озеро представляет собой две цепочки плесов, протянувшихся с севера на юг почти на 100 км и с запада на восток - на 40 км. Площадь водного зеркала оз. Селигер составляет 220 км<sup>2</sup> при средней глубине 5.8 м и максимальной - 28 м. Его водосборный бассейн площадью 2312 км<sup>2</sup> занимает водораздельное пространство в юго-восточной части Валдайской возвышенности. Среди многочисленных (~110) притоков, питающих озеро, значительных рек нет, наиболее крупные - р. Крапивна и Черемуха. Из южного плеса вытекает р. Селижаровка, впадающая в р. Волгу.

Исходя из физико-географических и гидробиологических особенностей, озеро разделено на 10 основных сильно расчлененных плесов: Полновский, Сосницкий, Кравотынский, Волоховщинский, Березовский, Слободский, Осташковский, Весецкий, Селижаровский, Владышинский. Плесы соединены между собой протоками, имеющими постоянное течение со скоростью 0.1-0.2 м/с. Наиболее глубокими плесами являются Слободской, Полновский и Березовский со средними глубинами 8.5-9.4, наиболее мелководны Весецкий и Селижаровский - 2-4 м. На озере насчитывается до 169 островов площадью от нескольких квадратных метров до 35 км<sup>2</sup> (о. Хачин).

### *Экологическое состояние озера на рубеже XX-XXI вв.*

В связи со значительной антропогенной нагрузкой на водосбор, уже в 1960-е гг. оз. Селигер приобрело статус мезотрофного водоема с отчетливо выраженными чертами эвтрофии в Осташковском плесе, особенно в его западной части. К таким чертам относили ярко выраженную гипоксию, вплоть до аноксии в придонных слоях впадин, появление сероводорода и накопление повышенных концентраций биогенных элементов - фосфора и азота [14].

Исследования, проводимые в первой половине 1990-х гг. [5, 6], свидетельствовали об усилении химической загрязненности озерной воды. Было выявлено увеличение в воде содержания хлоридов, сульфатов, железа и органических веществ. Наибольшую антропогенную нагрузку испытывали Осташковский, Слободский и Селижаровский плесы.

Более поздние исследования озера, проведенные в 1998-2000 гг. свидетельствовали об относительной стабилизации гидрохимических показателей. Вода озера была охарактеризована как среднеминерализованная, гидрокарбонатно-кальциевая с хорошо выраженным преобладанием ионов  $\text{HCO}_3^-$  (32-37%-экв.) и  $\text{Ca}^{2+}$  (28-33%-экв.). Общая минерализация изменялась по плесам от 117 до 134 мг/л. Согласно данным [9 и 19], концентрация общего фосфора в оз. Селигер в конце 1990-х гг. составляла 0.041-0.374 мг/л, общего азота - 1.5-3.6 мг/л. Наибольшие значения, как правило, наблюдались в юго-западной части Осташковского плеса и были обусловлены влиянием городских сточных вод и стока р. Емши. Величины БПК<sub>5</sub> изменялись в пределах 0.1-3.2 мгО/л. Максимальные значения были отмечены в Слободском плесе - 2.2-3.2 мгО/л (воды умеренно-загрязненные), в Сосницком и Березовском - 2.3-3.0 мгО/л (умеренно-загрязненные), в Полновском, Кравотынском, Серемском и Селижаровском - 0.9-1.5 мгО/л (воды чистые). В сравнении с данными, полученными в начале 1990-х гг., когда величина БПК<sub>5</sub> в Осташковском плесе в районе молокозавода составляла 8.5 мгО/л, произошло сокращение выброса загрязняющих веществ.

Основную роль в процессе образования органического вещества оз. Селигер играют планктонные водоросли, многие из которых относятся к видам индикаторам. Согласно исследованиям 1998-2000 гг., в составе летних альгоценозов озера было обнаружено 240 таксонов водорослей рангом ниже рода [16]. По количеству видов во всех сообществах преобладали диатомовые водоросли, а структуру биомассы фитопланктона определяли в основном динофитовые, синезеленые, диатомовые и криптофитовые [2]. В 1998 г. практически по всей акватории озера структуру биомассы определял *Ceratium hirundinella*, который составлял от 81 до 94% суммарной биомассы. Исключение составляли Полновский плес, озера Серемо и Белое, где помимо динофитовых развивались диатомовые и синезеленые водоросли. В 2000 г. по всей акватории озера развивались водоросли всех разделов.

Биомасса летнего фитопланктона на протяжении периода исследований колебалась в широких пределах - от 1.49 до 48.79 мг/л [2]. Ее максимальные значения были отмечены в Слободском и Осташковском плесах. При этом осредненные величины биомассы по всем плесам мало отличались. Так, в 1998 г. средняя биомасса составляла 17.3 мг/л, в 1999 г. - 16.6, в 2000 г. - 15.7 мг/л. По составу и уровню развития водорослей летнего планктона оз. Селигер было отнесено к водоемам мезотрофного типа с явно выраженными чертами эвтрофии на некоторых участках.

Интенсивность фотосинтеза изменялась по акватории озера от 0 до 4.35 мгО<sub>2</sub>/л. сут [15]. Наиболее высокие величины отмечались в Осташковском и Слободском плесах. У коллектора очистных сооружений, имеющих сток в р. Емшу, фотосинтез вообще не отмечался. Анализ величин интенсивности фотосинтеза по всему озеру показал их достаточно высокие значения, характерные для мезотрофных и эвтрофных озер. Подтверждением того, что озеро является высоко продуктивным послужил и анализ продукционно-деструкционных соотношений. В плесах оз. Селигер соотношение Ф/Д (фотосинтез/деструкция) почти всегда превышало 1, а на некоторых станциях было выше 4, что служило косвенным подтверждением загрязненности вод, когда большая часть органического вещества не успевает минерализоваться за вегетационный период. В то же время, соотношение индикаторных видов в составе перифитона и микрофитобентоса озера указывали, что даже воды наиболее загрязненного Слободского плеса характеризовались как



слабозагрязненные; исключение составляли лишь места выброса городских сточных вод и район кожевенного завода.

Зоопланктон озера с 1960-х по 2000-е гг. претерпел незначительные изменения, как по составу, так и по биомассе и структуре. В глубоководных северных плесах, наименее подверженных антропогенному воздействию, продолжал доминировать лимнический комплекс видов ракообразных «олиго-мезотрофного типа». Уровень биомассы ( $0.75-3.0 \text{ г/м}^3$ ) указывал на мезотрофный характер этого участка озера. Что же касается эвтрофированных участков, то биомасса зоопланктона в них была в 1-3 раза выше и достигала  $6.0-6.7 \text{ г/м}^3$  за счет резкого увеличения крупных ракообразных, особенно диаптомусов, дафний и диафанозомы, а также вспышек на отдельных участках крупной аспланхны [11]. В 2000 г. здесь отмечалось массовое развитие крупной *Moina rectirostris*, являющейся показателем загрязнения вод, что позволило охарактеризовать эти участки как высокосапробные.

Сопоставление полученных результатов по зообентосу с данными Ю.Е. Шангина [18] показало, что хотя структура сообщества за прошедшие между исследованиями 30-40 лет в целом не претерпела существенных изменений, продолжалось сокращение видового списка, а также смена доминирующих форм в отдельных плесах. Согласно исследованиям 1998-2000 гг. большинство встреченных видов являлось широко распространенными эврибионтами. Анализ видового состава позволял говорить об эвтрофном характере фауны. Преобладающим по числу видов была группа хирономид. Наиболее часто встречались личинки *Chironomus plumosus* и *Cladotanytarsus mancus*. Олигохеты были представлены двумя видами, обычно ассоциирующимися с полисапробными условиями: *Tubifex tubifex* и *Limnodrilus hoffmeisteri*. Биомасса зообентоса в северных плесах составляла  $0.5-1.03 \text{ г/м}^2$ , в Березовском плесе в профундали она достигала  $5.9 \text{ г/м}^2$ . Городской плес характеризовался высоким видовым богатством, биомасса колебалась в пределах  $0.1-6.8 \text{ г/м}^2$  [3]. Отдельно от всех станций этого плеса стояло устье р. Емши, где при крайне низких значениях видового разнообразия были отмечены максимальные значения биомассы -  $19.4 \text{ г/м}^2$ . На станции преобладали личинки *Chironomus plumosus*, показатели полисапробных условий.

Использование индексов для оценки состояния среды по мейобентосу и макробентосу показало, что большая часть акватории оз. Селигер определялась как умеренно-загрязненный водоем, часть литоральных станций характеризовались как почти чистые [4]. Вместе с тем ряд зон вблизи г. Осташково, о. Городомля и в районе сброса сточных вод характеризовались как загрязненные. Таким образом, из сопоставления исследований 1998-2000 гг. с более ранними исследованиями следовало, что, хотя по гидрохимическим показателям и можно было судить об относительной стабильности озера, но уже гидробиологические показатели, особенно в Осташковском плесе, далеко не всегда это подтверждали.

С начала 2000-х гг. исследования на оз. Селигер носили узкоспециальный характер, новых комплексных лимнологических исследований не проводилось. С учетом возобновления промышленного роста в регионе, активного развития сельского хозяйства и рекреации следует ожидать ухудшения экологического состояния озера. Одним из основных направлений развития территории оз. Селигер является укрупнение индустрии туризма, что сопровождается ростом населения, нарастанием темпов строительства, увеличением транспортных потоков. Возросшая нагрузка требует проведения новых комплексных исследований озера, позволяющих выявить его современное экологическое состояние и определить пути дальнейшего развития окружающей его территории. Тем более, что благополучие экосистемы озера Селигер, являющегося крупнейшим пресноводным водоемом Верхне-Волжского региона, в значительной степени определяет здоровье проживающего здесь населения, функционирование и устойчивое развитие экономики и окружающей среды.

Дальнейшие научные исследования оз. Селигер должны быть направлены на оценку факторов, определяющих процесс эвтрофирования водоема, а также на оценку компонентов токсического загрязнения водных объектов на водосборе, которые должны стать главными в обосновании мероприятий по управлению антропогенной нагрузкой на озеро. Решать возникающие проблемы можно только на основе серьезных комплексных исследований,

требующих значительных усилий, как со стороны профессиональных исследователей-лимнологов, так и региональных научных и административных организаций.

#### Литература:

1. Анучин Д. Н. Озера области истоков Волги и верховьев Западной Двины (по исследованиям 1894-1995 гг.). – М. – 1898. – 54 с.
2. Афанасьева А. Л. Структура и количественное развитие фитопланктона/ А. Л. Афанасьева// Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 166-171.
3. Беляков В. П. Структура и количественное развитие сообщества макрозообентоса/ В.П. Беляков // Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 200-207.
4. Беляков В. П., Заиканов В. Г., Шапоренко С. И., Шилькрот Г. С. Общие черты трансформации и современное состояние экосистемы озера Селигер/ В. П. Беляков, В. Г. Заиканов, С. И. Шапоренко, Г. С. Шилькрот// Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 224-230.
5. Бреховских В. Ф., Волкова З. В. Современное экологическое состояние некоторых водоемов Центральной России/ В. Ф. Бреховских, З. В. Волкова //Водные проблемы на рубеже веков. – М. – 1999. – С.291-305.
6. Бреховских В. Ф., Волкова З. В., Золотарева Н. С. Современное экологическое состояние оз. Селигер/ В. Ф. Бреховских, З. В. Волкова, Н. С. Золотарева // Водные ресурсы. – 1997. – Т.24, № 3. – С. 344-351.
7. Дексбах Н. К., Скадовский С. Н. Система озера Селигер. Общие выводы/ Н. К. Дексбах, С. Н. Скадовский //Уч. зап. МГУ. – 1936. – Вып. 8. Биология. – С.100-105.
8. Измайлова А. В. Озерные водные ресурсы европейской части Российской Федерации / А. В. Измайлова // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. №2. – С. 122-133.
9. Косов В. И., Косова И. В. Экология озера Селигер. – Тверь. – 2001. – 343 с.
10. Кузьмин Г. В., Охупкин А. Г. Фитопланктон и сапробность воды водоемов верховья Волги/ Г. В. Кузьмин, А. Г. Охупкин// Круговорот веществ и биологическое самоочищение водоемов. – Киев. – 1980. – С.75-91.
11. Макарецва Е. С. Структура и количественное развитие сообщества зоопланктона/Е.С. Макарецва // Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 191-200.
12. Никитинский Я. Я. О загрязнении водоемов общественного пользования стоками и отбросами кожевенных заводов/ Я. Я. Никитинский // Тр. Центр. ком. водоохр. – 1927. – Вып. 6. – С.183-205.
13. Паутова И. А., Шмитд В. М., Паутов А. А., Постовалова Г. Г. Вопросы охраны высших водных растений озера Селигер / И. А. Паутова, В. М. Шмитд, А. А. Паутов, Г. Г. Постовалова // Вестник ЛГУ. – 1988. – Сер. 3. Биол. Вып. 2. – С.49-53.
14. Покровская Т. Н., Россолимо Л. Л. Черты эвтрофирования озера Селигер/ Т. Н. Покровская, Л. Л. Россолимо // Типология озер. – М. – 1967. – С.27-52.
15. Станиславская Е. В. Водоросли перифитона и микрофитобентоса/ Е.В. Станиславская// Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 171-177.
16. Станиславская Е. В., Афанасьева А. Л. Видовой состав летних альгоценозов озера/ Е. В. Станиславская, А. Л. Афанасьева // Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 156-166.
17. Труды Пресноводной биологической станции Императорского С.-Петербургского Общества естествоиспытателей. – Том 1. – 1901. – 354 с.; Том 2. – 1906. – 372 с.
18. Шангин Ю. Е. Бентос озера Селигер / Ю. Е. Шангин // Озеро Селигер и его рыбные ресурсы. Т. 1. – 1963. – С. 58-69.

19. Шапоренко С. И., Шилькрот Г. С. Минерализация, биогенные вещества, кислород и сероводород в воде/ С. И. Шапоренко, Г. С. Шилькрот// Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 88-95.

20. Шапоренко С. И., Ясинский С. В. Влияние оз. Селигер на формирование водных ресурсов Верхней Волги/ С. И. Шапоренко, С. В. Ясинский // Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. – СПб. – 2004. – С. 120-131.

#### **L. SELIGER AS A LARGEST LAKE OF TVER REGION**

prof. Vallentina G. Drabkova,  
Chief Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
e-mail: [drabkova@limno.org.ru](mailto:drabkova@limno.org.ru)  
Anna V. Izmilova,  
Senior Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
prof. Nikolay A. Nesterov,  
Head of Geography and Environmental Laboratory  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

*Abstract:* L. Seliger is the largest water body of the Tver region, comprising more than ¼ of the total reserve of its lake waters. Lake's study was initiated in the XIX, but a special interest became after it's significant pollution, associated with the strengthening of economic activity in the catchment area. The last comprehensive researches of the lake were carried out at the turn of XX-XXI centuries. Currently, there is a question about necessity of the new research.

*Key words:* comprehensive research, the ecological status, eutrophication, toxic contamination

## ОСЕННИЙ ЗООПЛАНКТОН И БЕНТОС ЛИТОРАЛИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА САЙМА (ФИНЛЯНДИЯ)

Дина Сергеевна Дудакова  
к.б.н., научный сотрудник  
лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН  
E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)

Родионова Наталья Владимировна  
научный сотрудник  
лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН  
E-mail: [nleptodora@mail.ru](mailto:nleptodora@mail.ru)

Лаури Арвола  
профессор

Биологическая станция Ламми Хельсинского Университета, Финляндия  
E-mail: [lauri.arvola@helsinki.fi](mailto:lauri.arvola@helsinki.fi)

*Аннотация:* Осенью 2015 г. в озерном комплексе Сайма, четвертом по размерам озере Европы, было проведено исследование литорального зоопланктона, а также макро- и мейобентоса. Согласно полученным результатам в разных частях озера видовой состав сообществ существенно варьирует. Различия структурных характеристик бентоса были более тесно связаны с гранулометрией грунтов, тогда как на зоопланктон наибольшее влияние оказывал химический состав воды. При исследовании видового состава мейобентоса был обнаружен ранее не описанный для озера реликтовый вид гарпактицид *Morarina duthei* (Scott). Исследования показали, что существенных изменений в видовом составе бентоса на озере Сайма по сравнению 1990-ми годами не произошло. По зоопланктону данные предыдущих лет гораздо более скудные и наши работы позволяют дополнить сведения по этому сообществу. Полученные результаты по зоопланктону и бентосу могут быть использованы для мониторинга состояния южной части озера Сайма.

*Ключевые слова:* озеро Сайма (Финляндия), зоопланктон, макробентос, мейобентос, видовой состав

Озерная система Сайма, находящаяся в Восточной Финляндии, является самым крупным озером в Финляндии и четвертым по величине в Европе. Ее площадь занимает 4460 км<sup>2</sup>. Озерный бассейн характеризуется высокой фрагментарностью, имеет более 13700 островов и полуостровов, общая длина береговой линии 14850 км. Максимальная глубина озера – более 80 м, средняя – 17 м. Основные озера внутри этой озерной системы - Suur-Saimaa, Orivesi, Puruvesi, Naukivesi, Yövesi, Pihlajavesi и Puhäselkä (Рис.1). Озера объединены узкими проливами. Озера системы отличаются друг от друга своими гидрологическими и лимнологическими условиями, а также видами и степенью антропогенного влияния на качество воды [22; 19]. В южной части озера Сайма соединено с Ладожским озером рекой Вуокса и далее через Ладожское озеро через р. Нева – с Балтийским морем. Кроме того существует прямой путь из Саймы в Балтийское море через Сайминский канал. Следует отметить, что р. Вуокса закрыта для навигации из-за наличия большого числа порогов, тогда как Сайминский канал активно используется для транспорта различных продуктов производства, таких как древесина, продукты добычи камня, металлы, целлюлоза, бумага и другие, а также в туристических целях.

Сообщества беспозвоночных озерной системы Сайма изучалось ранее рядом исследователей [6,7;9;10;14;18;22;23;24;25 – макробентос; 10;11;13;17 – зоопланктон и мейобентос]. Большинство этих работ проводилось в центральной и северной частях озерной системы Сайма – на озерах Puhäselkä, Naukavesi и Puruvesi. Однако для южных озер системы данные по сообществам беспозвоночных очень скудны. Следует отметить, что южная часть Саймы находится под риском

антропогенного загрязнения от целлюлозно-бумажных комбинатов гг. Лапеенранта и Йоутсено [12]. Этот же район находится под наибольшим риском вселения инвазивных видов гидробионтов в связи с близостью Сайминского канала.

Целью нашего исследования было сделать таксономический обзор современных популяций литорального зоопланктона и макро- и мейобентоса, а также количественного развития макро- и мейобентоса южной Саймы. Поскольку отбор проб проводился в октябре, результаты выявляют структуру осенних сообществ беспозвоночных.

Отбор проб проводился 14-15 октября 2015 г. на шести станциях озер Suur-Saimaa и Yövesi озерной системы Сайма (Рис. 1). Согласно Rahkola-Sorsa [17], средняя прозрачность озер этого района варьирует между 1.7 и 3.6 м, концентрация общего фосфора – между 4 и 20 мг/м<sup>3</sup>, максимальная концентрация хлорофилла а может достигать 13 мг/м<sup>3</sup>. Литоральные биотопы отличаются по представленности разных субстратов и степени ветрового воздействия. Здесь представлены три основных типа биотопов: каменистые песчаные и заросшие макрофитами. Каменистые биотопы представляют собой пояс гальки и валунов, простирающийся до глубин 1-2 м. Субстратом песчаных биотопов является песок разной степени крупности со скудной вегетацией. В зарослевой литорали грунтами, как правило, являются тонкие пески, ил, растительный детрит [22;23;24]. Берега станций 1-4 были каменистыми, а 5 и 6 – песчаными. Макрофиты были представлены плотными зарослями тростника (*Phragmites australis*), широко распространенным и доминирующим видом на этой части акватории. Лишь на станции 6 сообщество макрофитов отличалось большим разнообразием; помимо тростника здесь встречены рдесты (*Potamogeton*), кубышка (*Nuphar*) и ряд других видов макрофитов. На каждой станции исследовались сообщества как открытой каменистой (или песчаной) литорали, так и зарослевой.

Пробы на качественный состав зоопланктона отбирались сетью Апштейна (диаметр ячеи 120 мкм). Пробы бентоса брались с глубин 0,5 и 2-3 м. При отборе проб макробентоса использовался дночерпатель Экмана-Берджи с площадью захвата 1/40 м<sup>2</sup>, для отбора мейобентосных проб использовалась стальная трубка с диаметром 7 см. На наименьших глубинах в каменистой литорали брались пробы песчаного грунта, расположенного между камнями. Для сбора качественных проб макробентоса использовался скребок (диаметр ячеи 500 мкм). Животные фиксировались 4%-ным формалином. Отбор и обработка проб проводилась согласно стандартным методикам [1;2;3;15]. Для определения гранулометрического состава донных грунтов использовался ситовый метод [5]. Для выявления степени различия видового состава сообществ использовался коэффициент сходства Серенсена-Чекановского ( $Q_s$ ) [4].

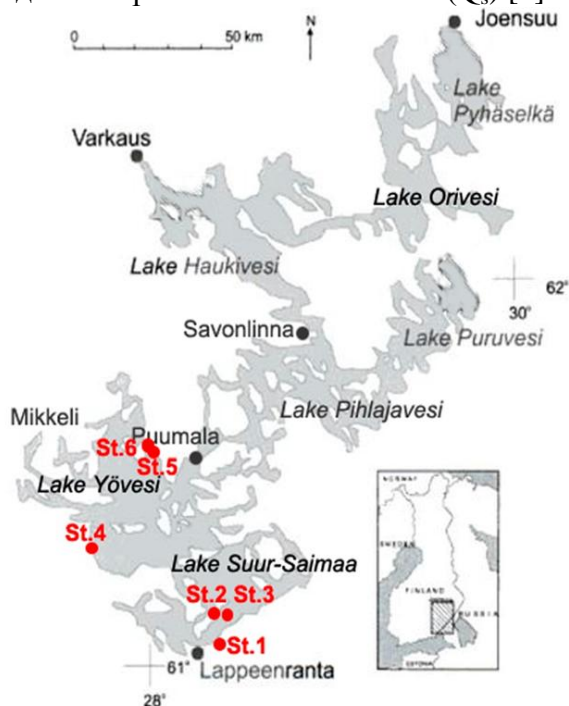


Рис. 1. Станции отбора проб.

В видовом составе зоопланктона обнаружен 51 таксон, принадлежащий к четырем систематическим группам: 16 видов или групп Rotifera, 24 - Cladocera, 4 - Calanoida и 6 - Cyclopoidea. Большинство видов широко распространены и на литоральных станциях их число варьировало от 14 до 36. Самое высокое число таксонов было выявлено на станции 3 в южной части озера Suur-Saimaa. Только пять видов - *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* Leidig, *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller), *Eudiapomus gracilis* (Sars), *Thermocyclops oithonoides* (Sars) и *Mesocyclops leuckarti* (Claus) – встречались на всех станциях. Среди коловраток был встречен инвазивный вид *Kellicottia bostoniensis*, уже известный для финских озер. Место находки – станция 3.

В период исследований анализ видового состава зоопланктона показал существенные различия между разными частями озера, имеющими различия в химическом составе озерных вод. Диапазон изменений коэффициента Серенсена между станциями озер Suur-Saimaa и Yövesi составлял 0.3 – 0.4. Наибольшая степень сродства ( $Q_s = 0.8$ ) отмечена между ст. 1 и ст. 2, которые расположены в южной части озера. В целом, для исследованных участков литорали оз. Сайма для зоопланктона отмечена невысокая степень сродства.

Численность и биомасса макробентоса исследованных станций изменялась от 280 до 2400 экз./м<sup>2</sup> и от 0,5 до 5,6 г/м<sup>2</sup>. Были встречены представители следующих систематических групп: Oligochaeta, Hirudinea, Nematoda, Gastropoda, Chironomidae, Ceratopogonidae, Ephemeroptera, Trichoptera, Odonata, Amphipoda, and Isopoda. В структуре сообщества доминантами на станциях вблизи Сайминского канала (ст.1 и 2) являлись хирономиды. Тогда как на остальных станциях по биомассе доминировали олигохеты и ручейники. Число видов/таксонов варьировало от трех до девятнадцати; самое высокое видовое богатство отмечено для ст. 3 (19 видов/таксонов) и ст. 1 (11).

Плотность и биомасса мейобентоса на разных станциях варьировала от 720 до 18000 экз./м<sup>2</sup> и от 0,1 до 2,5 г/м<sup>2</sup>, соответственно. В мейобентосе встречались: Oligochaeta, Nematoda, Chironomidae, Ephemeroptera, Trichoptera, Harpacticoida, Cyclopoidea, Cladocera, Turbellaria, Acari и Tardigrada. В сообществе станций 1 и 2 доминировали хирономиды и ручейники, на остальных станциях – олигохеты. Число видов/таксонов варьировало от шести до двадцати пяти; самое высокое видовое богатство отмечено для ст. 5.

На основании анализа видового состава для макробентоса было выявлено 30 таксонов из 11 систематических групп, а для мейобентоса – 37 таксонов из 11 систематических групп. Общее число видов донных беспозвоночных составило 56. Наиболее распространенными группами были Chironomidae (12 видов/таксонов), Oligochaeta (8), Trichoptera (8), Cladocera (6) и Harpacticoida (5). Для бентоса также имелись существенные различия в разных частях исследованной акватории. Коэффициент сродства Серенсена-Чекановского варьировал между 0,22-0,33 для мейобентоса и 0-0,36 для макробентоса. Самое высокое сродство макробентоса было выявлено для станций 2 и 4, а для мейобентоса – для станций 2 и 5. Самое низкое сродство отмечено для станции 1 со станциями 4 и 5. Основным фактором, обусловившим различия сообществ, является гранулометрический состав грунтов.

Результаты исследований показали, что географическая удаленность станций отбора проб и соответствующие изменения в химическом составе вод является важнейшим фактором, влияющим на зоопланктонные сообщества, на их сродство. В то время как для бентоса более важным фактором оказывается качество дна, в частности гранулометрия донных грунтов. Качество дна объясняло высокое сродство между бентосными сообществами станции 2 (южная часть оз. Сайма) и станций 4-5, которые расположены севернее ближе к центральной части озера. Биотопы этих участков представляли собой средний - крупный песок (среднемедианный размер частиц 0.8-1.7 мм), покрытый относительно небольшим количеством гальки и валунов по сравнению с другими станциями с каменистой литоралью.

Сравнение наших данных с работами других исследователей показало отсутствие существенных изменений в составе изучаемых сообществ за последние десятилетия [7;13;16;25]. Полученные нами данные по таксономическому составу зоопланктона южной части озерной системы Саймы значительно дополнили имеющийся видовой список зоопланктона для этой части озера.

Наши работы позволили несколько расширить знания о литоральном бентосе озера Сайма. В мейобентосе была выявлена реликтовая гарпактицида *Moraria duthei* (Scott), ранее не зарегистрированная для озера Сайма, хотя этот вид распространен в Европе и встречается в финских озерах [21]. Кроме того при проведении исследований в литорали было встречено два вида реликтовых амфипод - *Gammarus lacustris* и *Pallasea quadrispinosa*. Эти виды - хорошо известные и изученные обитатели озера Сайма [20]. В частности палласея является stenothermным видом, предпочитающим холодные воды. Ее сезонные миграции зависят от температуры воды, и в летнее время животные перемещаются в глубоководные слои с низкой температурой (~10°C), тогда как осенью они обычно мигрируют в литоральную зону [8]. Это явление для *P. quadrispinosa* было отмечено нами при изучении литорального бентоса осенью.

Полученные результаты по зоопланктону и бентосу могут быть использованы для организации мониторинга состояния южной части озера Сайма.

#### Литература:

1. Курашов Е. А. Мейобентос как компонент озерной экосистемы. – СПб: Алга-Фонд, 1994 – 224 с.
2. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. – Л.: ГосНИОРХ, 1983. - 51 с.
3. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. – Л., 1981. – 29с.
4. Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. - М.: Наука, 1982. - С. 119–143.
5. Allen T. A. Particle size measurement (4th ed.). London: Chapman and Hall. - 1990. - P. 202.
6. Bagge P. Aquatic insects and water mites (Acari: Hydrachnellae) of Lake Saimaa, 1980-1983 (Saimaan vesihyönteis- ja vesipunkkif aunasta vuossina 1980-1983 // Saimaa Symposium 1985, Saimaa. – Joensuu: Joensuun yliopisto, 1986.- P. 146-155.
7. Bagge P., Liimatainen H.-M., Liljaniemi P. Comparison of sampling methods for semipelagic animals in two deep basins of Lake Saimaa // Hydrobiologia. -1996. - V. 322. - P. 293-300.
8. Hill C., Furst M., Hammer J. Introduction of the amphipods *Pallasea quadrispinosa* and *Gammaracanthus lacustris* into lakes in Northern Sweden // Ann.Zool. Fenn., 1990. - V. 27. - P. 241-244.
9. Holopainen I. J., Hämäläinen H., Tolonen K. T. Littoral invertebrates in classification of ecological status of lakes: An example from Lake Saimaa, Finland // Classification of ecological status of lakes and rivers (eds. Bäck S., Karttunen) Tema Nord. - 2001. - P. 52-56.
10. Hynynen J., Palomäki A., Veijola H. et al. Planctonic and zoobenthic communities in an oligotrophic, boreal lake inhabited by an endemic and endangered seal population // Boreal environment research. - 1999. - V. 4. - P. 145-161.
11. Hämäläinen H. & Karjalainen J. An assessment of Harpacticoida and resting stages of Cyclopoida as trophic indicators in Finnish lakes // Ann. Zool. Fennici. - 1994. - V. 31. - P. 377-388.
12. Karels A. E., Niemi A. Fish community responses to pulp and paper mill effluents at the southern Lake Saimaa, Finland // Environ. Pollut. - 2002. - V. 116(2). - P. 309-17.
13. Karjalainen J., Holopainen A-L. & Huttunen P. Spatial patterns and relationships between phytoplankton, zooplankton and water quality in the Saimaa lake system, Finland // Hydrobiologia. - 1996. - V. 322. - P. 267-276.
14. Meriläinen P. Exposure Assessment of Animals to Sediments Contaminated by Pulp and Paper Mills. - Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2007. - 80 p.
15. Methods for the collection and analysis of benthic macroinvertebrate assemblages in wadeable streams of the Pacific Northwest. Pacific Northwest Aquatic Monitoring Partnership, Cook, Washington. Hayslip, Gretchen, editor. - 2007. - 27 p.
16. Paasivairta L. Non-biting midges (Diptera, Chironomidae) of Lake Saimaa (Saimaan surviaissääsket (Diptera, Chironomidae) // Saimaa Symposium 1985, Saimaa today (Saimaaseminaari 1985, Saimaan nykytila) ed. by M. Viljanen. – Joensuu: Joensuun yliopisto, 1986. - P. 163-170.



17. Rahkola-Sorsa M. The structure of zooplankton communities in large boreal lakes and assessment of zooplankton methodology. – Joensuu: University of Joensuu, 2008, 41 p.
18. Ruokonen T.J., Karjalainen J. & Hämäläinen H. Effects of an invasive crayfish on the littoral macroinvertebrates of large boreal lakes are habitat specific // *Freshwater biology*. - 2014. - V. 59. - P. 12-25.
19. Sipilä T. Conservation biology of Saimaa ringed seal (*Phoca hispida saimensis*) with reference to other European seal populations. - Dep. Ecology and Systematics, Div. of Population Biology, Univ. of Helsinki, Finland, 2003. - 40 pp.
20. Sjöberg T., Valta O., Salonen J., Figueiredo K., & Taskinen J. Diel vertical migrations of the macroscopic crustaceans *Gammaracanthus lacustris*, *Mysis relicta*, *Monoporeia affinis* and *Pallaseopsis quadrispinosa* in Lake Paasivesi, Saimaa // *Symposium on Large Lakes 2010: Climate change – changing freshwater ecosystems and society*. - 2010. - pp. 117-121.
21. Särkkä J., Meriläinen J. J., Hynynen J. The distribution of relict crustaceans in Finland: new observations and some problems and ideas concerning relicts // *Ann. Zool. Fennici*. - 1990. - V. 27. - P. 221-225.
22. Tolonen K. T., Holopainen I. J., Hämäläinen H. et al. Littoral species diversity and biomass: concordance among organismal groups and the effects of environmental variables // *Biodiversity and Conservation*. - 2005. - V. 14. - P. 961-980.
23. Tolonen K. T., Hämäläinen H. Comparison of sampling methods and habitat types for detecting impacts on lake littoral macroinvertebrate assemblages along gradient of human disturbance // *Fundam. Appl. Limnol., Arch. Hydrobiol.* - 2010. - V. 176(1). - P. 43-59.
24. Tolonen K. T., Hämäläinen H., Holopainen I.J. & Karjalainen J. Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system // *Arch. Hydrobiol.* – 2001. – 152(1). - pp. 39-57.
25. Tolonen K. T., Hämäläinen H., Luotonen H., Kotanen J. Rantavyöhykkeen pohjaeläimet järvien ekologisen tilan arvioinnissa ja seurannassa. – Joensuu, 2003. - 60 p.

#### **AUTUMN LITTORAL ZOOPLANKTON AND BENTHOS OF SOUTHERN LAKE SAIMAA (FINLAND)**

Dina S. Dudakova

PhD, researcher of laboratory of hydrobiology

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)

Natalia V. Rodionova

researcher of laboratory of hydrobiology

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)

Lauri Arvola

Professor Lammi Biological Station, University of Helsinki, Lammi, Finland

E-mail: [lauri.arvola@helsinki.fi](mailto:lauri.arvola@helsinki.fi)

*Abstract:* In autumn 2015 samples for zooplankton and benthos of the lake complex of Saimaa, the fourth largest lake in Europe, were collected in order to review its recent zooplankton and macro- and meiobenthos communities. On the basis of zooplankton species, the community compositions varied remarkable between different parts of the lake. Regarding the community composition of benthos, the different sampling stations varied due to differences in bottom material, i.e. varying granulometry. Among the meiobenthos, a relict crustacean harpacticoida, *Moraria duthei* (Scott), was found first time for Lake Saimaa. Our results indicate that in the study area no major changes have taken place in the species composition of benthos since 1990s. The reference zooplankton data is less numerous, and our results complement the previous investigations of the lake. In long-term, the zooplankton and benthos data can be used for monitoring the status of the southern part of Lake Saimaa.

*Keywords:* Lake Saimaa (Finland), zooplankton, macrobenthos, meiobenthos, species compound



## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Наталья Владимировна Егорова,  
Студент кафедры геофизики СПбГУ  
«Санкт-Петербургский Государственный Университет»  
E-mail: [Egorovanataliia@gmail.com](mailto:Egorovanataliia@gmail.com)

*Аннотация:* В основу настоящей работы легли данные, полученные на акватории Ладоги научно-исследовательской экспедицией Института наук о Земле СПбГУ, Центра анализа сейсмических данных МГУ им. Ломоносова и Института водных проблем Севера КарНЦ РАН в сентябре 2015 года. В результате проведенных работ были получены новые данные, позволившие уточнить геологическое строение верхней части разреза донных отложений Ладожского озера, включая четвертичный покров и подстилающие горизонты коренных пород.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, геологическое строение, сейсмоакустическое профилирование

Проблема образования и истории развития Ладожского озера до настоящего времени по многим аспектам остается дискуссионной и оставляет обширный ряд важных вопросов, требующих дальнейшей научной проработки.

Научно-исследовательская экспедиция, проводимая в 2015 году Институтом наук о Земле СПбГУ, Центром анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова и Институтом Водных проблем Карельского филиала РАН на акватории Ладожского озера, была направлена на изучение геологического строения верхней части разреза, отражающей динамику деградации последнего Скандинавского ледникового щита. Основное внимание было уделено южной части озера, где в результате Новолadoжской трансгрессии были затоплены обширные поверхности ледниково-озерной равнины. Данные, полученные непосредственно в экспедиции, легли в основу настоящей работы.

### **Общая характеристика**

Котловина Ладожского озера сформировалась на окраине Балтийского щита, южнее она перекрыта чехлом Восточно-Европейской платформы. В зоне перехода от щита к плите развиты структурные комплексы фундамента архейского и раннепротерозойского возраста и плитного чехла, сложенного терригенными породами верхнего венда – нижнего кембрия. Особенности котловины связаны с распространением раннерифейского и более молодого, предположительно поздне-раннерифейско-ранневендского комплексов, слагающих грабен-синклиналь [2,3,4,5].

За четвертичный период территория, занятая в настоящее время Ладожским озером и его водосбором, многократно подвергалась покровным оледенениям. В геологической летописи достаточно полно отражены поздне- и послеледниковое время последнего валдайского оледенения. Следы предшествовавших событий сохранились в ограниченных объемах, так как формировавшиеся в течение каждого из них отложения в значительной степени уничтожались при развитии очередных покровных ледников. В связи с этим детальное восстановление палеогеографической обстановки рассматриваемой территории в периоды, предшествовавшие валдайскому оледенению, остается пока проблематичным [1,4,7].

На значительных площадях озерного дна развит почти сплошной покров поздне-послеледниковых осадков водно-ледникового и озерного генезиса. Молодые рыхлые отложения нередко заполняют впадины и формирования склоновых покровов. Указанные процессы привели к образованию рельефа выровненных равнин, занимающих наиболее низкое положение в рельефе или платообразно залегающих на возвышенностях дочетвертичного субстрата.

В нижней части вскрытых на дне четвертичных осадков находятся ледниковые отложения (валунный суглинок – морена), которые представляют собой несортированную смесь валунов,

глыб, щебня и мелкозема песчано-глинистой размерности со средней плотностью 2,1-2,4 г/см<sup>3</sup>. Состав такого несортированного материала довольно разнообразный, но доминируют в нем граниты (в том числе рапакиви) и кварцевые песчаники [5, 9].

Ледниково-озерные отложения представлены ленточными глинами, которые либо перекрывают моренные отложения, либо залегают непосредственно на коренных породах фундамента. Они характеризуются ярко выраженной градиционной слоистостью, обусловленной чередованием глинистых слоев, сравнительно тонких и окрашенных в более темные тона, и более грубых, светлоокрашенных алевритовых или песчаных слоев [4, 5, 6, 8].

Выше по разрезу наблюдается постепенное уменьшение слоев ленточных глин вплоть до их полного исчезновения и замещения озерными осадками - серыми гомогенными глинами небольшой мощности (0,2–0,8 м). Описываемые глины, как правило, уплотнены (1,5-2,0 г/см<sup>3</sup>), а влажность не превышает 30-40% [5,6,9].

Примерно 9500-9000 лет назад толщи гомогенных глинистых отложений сменились бурыми, зеленовато-коричневыми озерными осадками – илами и сапропелями, а в устьях рек началось образование торфяников [1, 7, 8].

### **Методика**

Геолого-геофизические работы на акватории Ладожского озера проводились на специализированном научно-исследовательском судне «Эколог», оборудованном комплексом аппаратуры для возбуждения и приема сейсмоакустических сигналов.

Работы выполнялись по двум модификациям: низкочастотной, с применением электроискрового источника – спаркера, и высокочастотной, с использованием электродинамического источника – бумера. Прием сигналов осуществлялся с помощью пьезокерамических одноканальной и 16-канальной сейсмических кос.

Проведенные исследования позволили в ряде случаев перейти к детальному расчленению ледниково-озерных отложений. После обработки и интерпретации полученных сейсмоакустических разрезов были выделены основные толщи четвертичных отложений, а также комплексы подстилающих коренных пород рифея и венда.

Данные осадки отличаются между собой характером записи и разделены четкими сейсмическими отражающими границами, указывающими на смену характера осадконакопления или на его перерыв, что позволяет почти однозначно выделять их на сейсмоакустических разрезах.

На рисунке 1 представлен типичный разрез южной части Ладоги, на котором отчетливо выделяются все вышеперечисленные толщи осадков. Здесь хорошо видна горизонтальная слоистость вендских отложений, которые перекрыты моренным материалом мощностью 2-5 м (реже 8 м), опознаваемым по специфической «хаотической» записи и неровной, расчлененной поверхности. Выше по разрезу - выдержанный по мощности, сплошной слой ледниково-озерных ленточных глин (10-15 м) с характерной для них слоистостью. Глины в свою очередь сменяются маломощной толщей современных озерных осадков (до 10 м), скрывающих неровности ледникового рельефа.

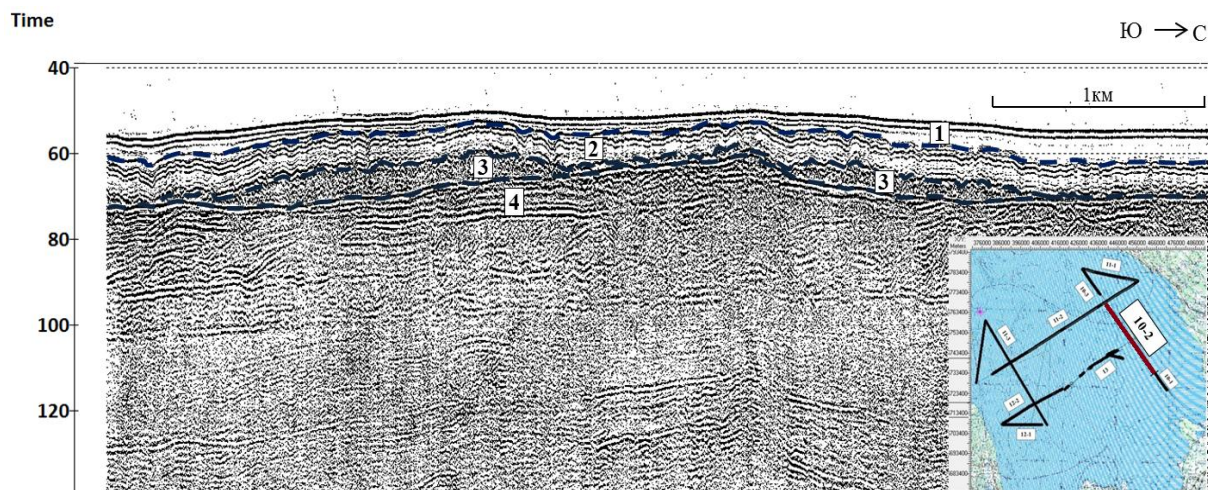


Рис. 1. Сейсмоакустический разрез по фрагменту профиля 10-2.

1 - озерные голоценовые отложения, глины, илы; 2 - ледниково-озерные верхнеплейстоценовые ленточные глины; 3 - ледниковые верхнеплейстоценовые отложения, морена; 4 – вендские слоистые песчано-глинистые отложения.

На рисунке 2 приведен пример разреза, где достаточно хорошо просматривается маломощный, временами пропадающий слой озерных голоценовых осадков, перекрывающий слой неяснослоистых ледниково-озерных глин. В нижней части разреза четвертичных отложений находится толща моренных образований. Ниже залегает комплекс горизонтально-слоистых отложений, который может быть отнесен к венду. В правой части разреза видно, что горизонтально-слоистые вендские породы подстилаются наклонными, неправильно слоистыми отложениями, которые можно отнести к рифею. Если такие предположения верны, то толщи пород рифейского возраста заходят гораздо южнее, чем это предполагалось ранее.

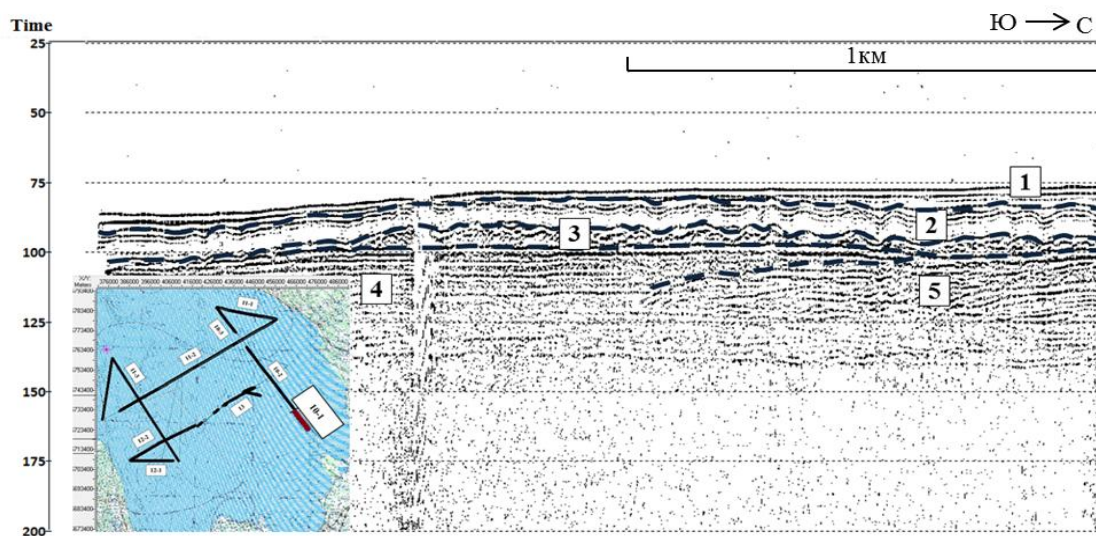


Рис. 2. Сейсмоакустический разрез по участку профиля 10-1. 1 - озерные голоценовые глины, илы; 2 - ледниково-озерные верхнеплейстоценовые ленточные глины; 3 – ледниковые верхнеплейстоценовые отложения, морена; 4 – вендские слоистые песчано-глинистые отложения, 5 – наклонные, слоистые отложения возможно рифейского возраста.

## Результаты

Выполненные в 2015 г. сейсморазведочные работы на акватории Ладожского озера методом сейсмоакустического профилирования показали высокое качество, надежность, эффективность съемок и достоверность полученных данных. Комбинация одноканальных и многоканальных систем наблюдений, а также источников типа бумер и спаркер позволила исследовать разрез Ладоги на достаточно большую глубину с высокой разрешающей способностью, что еще раз

подтверждает преимущества использования данного метода при изучении верхней части разреза на мелководных акваториях.

В результате проведенных работ были получены новые данные, позволившие уточнить геологическое строение верхней части разреза Ладожского озера:

- прослежены реальные границы изучаемых толщ;
- оценены мощности четвертичных осадков;
- отмечен сложный характер формирования горизонта моренных отложений, в том числе и за счет смятия подстилающих глинистых горизонтов;
- выявлены выходы рифейских пород значительно южнее, чем предполагалось ранее;
- получены данные о характере рельефа озерного дна.

Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, доценту кафедры геофизики, Т.С. Сакулиной за оказанную помощь и руководство при написании работы, сотрудникам Центра анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова, М.Ю. Токареву и М.Ю. Алешину за предоставленные данные, а также профессору кафедры геоморфологии СПбГУ, А.Е. Рыбалко за участие и консультации в процессе выполнения данной работы.

#### Литература:

1. Абрамова С. А., Давыдова Н. Н., Квасов Д. Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов// История озер Северо-Запада. – 1967. – С. 113-132.
2. Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера// Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 22-32.
3. Амантов А. В., Спиридонов М. А. Геология Ладожского озера // Советская геология. – 1989. – № 4. – С. 83-86.
4. Квасов Д. Д., Мартинсон Г. Г., Раукас А. В. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР). – Л.: Паука. – 1989. – С. 280.
5. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / ред. В. А. Румянцев. — СПб.: Нестор-История. – 2015. – С. 200.
6. Румянцев В. А., Кондратьев С. А. Ладога: монография. – СПб.: Нестор-История. – 2013. – С. 568.
7. Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние// Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). – 2010. – №1. – С. 171-181.
8. Субетто Д. А. Строение, особенности и история формирования донных отложений // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. – 2002. – С. 122–135.
9. Subetto D., Davydova N., Rybalko A, Contribution to the lithostratigraphy and history of lake Ladoga // palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology. – 1998. – № 140. – С.113-119.

### **THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE UPPER PART OF LAKE LADOGA SECTION ACCORDING TO THE SEISMIC ACOUSTIC PROFILING**

Nataliia Vladimirovna Egorova,  
Student of Saint-Petersburg State University,  
E-mail: [Egorovanataliia@gmail.com](mailto:Egorovanataliia@gmail.com)

*Abstract:* The scientific research expedition organized by the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, the Center of analysis seismic data of Moscow State University and the Institute of Water Problems of the Karelian branch of Russian Academy of Sciences carried out in 2015 in the southern part of Lake Ladoga was aimed at detailed study of the geological structure of the upper section. Data obtained directly in this expedition formed the basis of this work. As a result was obtained new data, which clarified the characteristic of the geological structure of the upper part of the section of Lake Ladoga, including quaternary cover and underlying horizons bedrock.

*Keywords:* Lake Ladoga, geology, seismic acoustic profiling



## ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Татьяна Владимировна Ефремова,  
к.г.н. старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
e-mail: [efremova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:efremova@nwpi.krc.karelia.ru)  
Николай Иннокентьевич Пальшин,  
к.г.н. старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Роман Эдуардович Здоровеннов,  
к.г.н. старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Андрей Васильевич Митрохов,  
главный гидролог ИВПС КарНЦ РАН  
Галина Эдуардовна Здоровеннова,  
к.г.н., и.о. заведующего лабораторией  
ИВПС КарНЦ РАН  
Галина Геннадиевна Гавриленко,  
аспирант, младший научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН  
Сергей Юрьевич Волков,  
аспирант, и.о. младшего научного сотрудника  
ИВПС КарНЦ РАН  
Сергей Рэмович Богданов,  
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Аркадий Юрьевич Тержевик,  
к.т.н., ведущий научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН

*Аннотация:* Приводятся результаты анализа данных измерений температуры в Петрозаводской губе Онежского озера в марте 2015 г. в период развития весенней подледной конвекции. Показано, что термическая структура озера формируется под влиянием радиационного прогрева подледного слоя воды и динамических процессов в заливе, предположительно, внутренних волн в придонном стратифицированном слое, а также взаимодействия с водами залива.

*Ключевые слова:* весенняя подледная конвекция, температура, теплосодержание, Онежское озеро

Исследование термической структуры Петрозаводской губы Онежского озера проводилось в марте 2015 г. в рамках международного междисциплинарного проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений», поддержанного фондом ЭЛЕМО (Швейцария) [1].

Период измерений (14-25 марта 2015 г.) пришелся на развитую подледную конвекцию, обусловленную радиационным прогревом. В центральной части губы со льда была установлена термокося (глубина станции 27.5 м), на которой с дискретностью 0.25-5 м от нижней границы льда до дна были закреплены высокочувствительные датчики температуры и давления канадской фирмы RBR Ltd. Интервал измерений составлял десять секунд. Параллельно с часовой дискретностью проводились зондирования водной толщи прибором CTD-90M Sea & Sun Technology, Германия.

Вблизи станции зондирования была установлена радиационная станция, на которой с минутной дискретностью в течение всего периода полевых работ проводилось измерение потоков падающей и отраженной солнечной радиации на поверхности льда, и подледной радиации. Также

рядом была установлена метеостанция, фиксирующая температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра с дискретностью десять минут.

Анализ накопленного массива данных позволил проследить и проанализировать внутрисуточную и синоптическую эволюцию вертикальной термической структуры центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в период развитой подледной конвекции.

Период измерений можно разбить на два отрезка, резко отличающихся по погодным условиям: с 14 по 19 марта стояла ясная, теплая, солнечная, маловетренная погода, 20 марта резко похолодало, ветер усилился до 8-10 м/с, несколько раз выпадал снег, наблюдалась сплошная или переменная облачность.

Потоки солнечной радиации на нижней границе льда, играющие решающую роль в развитии конвекции, также претерпевали заметные изменения в соответствии с описанными погодными условиями. В первые дни измерений дневной максимум потока проникающей под лед солнечной радиации достигал  $150 \text{ Вт/м}^2$ , после выпадения свежего снега – резко снизился до  $30\text{-}50 \text{ Вт/м}^2$ .

В течение всего периода измерений термическая структура центральной части Петрозаводской губы Онежского озера была типичной для весенней подледной конвекции [2]: отчетливо выделялись три слоя - подледный градиентный (его нижняя граница располагалась на 0.5-0.8 м ниже льда), конвективно-перемешанный слой (КПС, нижняя граница которого изменялась в период измерений в пределах 15-20 м) и нижележащий стратифицированный (рис 1).

В солнечные дни происходил объемный нагрев поверхностного слоя водной массы, что индуцировало процесс конвекции, нижняя граница КПС заглублялась, его температура повышалась, в ночные часы происходила ре-стратификация. В пасмурные дни наблюдалось уменьшение глубины нижней границы КПС. Ниже КПС, мы наблюдали устойчиво стратифицированный придонный слой, с характерными значениями частоты плавучести  $N^2 \sim 10^{-5} \text{ с}^{-2}$ . В стратифицированном слое периодически отмечались волнообразные колебания изотерм. В течение периода измерений температура КПС повысилась от  $0.6$  до  $0.96^\circ\text{C}$ .

В ночные часы происходила заметная перестройка вертикального температурного профиля: понижалась температура в верхней части КПС, при этом в нижней его части наблюдались ступенчатые структуры, температура зачастую повышалась. Предположительно, такой характер изменения профиля был обусловлен обрушением внутренних волн.

Характер изменений теплосодержания КПС соответствовал случаю конвекции в чистом виде только 17-19 марта: повышение в дневные часы и стабилизация в вечерние и ночные. В другие дни наблюдались отклонения от «нормы». Например, 15 марта теплосодержание КПС непрерывно увеличивалось не только в дневные часы, но и в течение всей последующей ночи. Увеличение теплосодержания КПС 21 и 22 марта началось только в середине дня и продолжалось вечером и ночью. Изменение теплосодержания стратифицированного слоя также характеризовалось существенной неравномерностью: рост или падение на протяжении всего суточного цикла, или чередование роста и падения в пределах одного цикла. Изменения в теплосодержании КПС и стратифицированного слоя в ряде случаев были противоположными, например, в дневные часы 19 марта. Предположительно, такой характер изменения теплосодержания слоев мог быть обусловлен крупномасштабным адвективным переносом между акваторией Онежского озера и Петрозаводской губой.

Таким образом, очевидно, что, наряду с конвекцией, термическая структура формировалась под влиянием ряда других гидродинамических процессов и явлений, в частности, внутренних волн в стратифицированном слое, а также крупномасштабного горизонтального переноса между Петрозаводской губой и акваторией Онежского озера. Использование измерителей течений в будущих исследованиях позволит нам установить природу этих явлений и процессов.

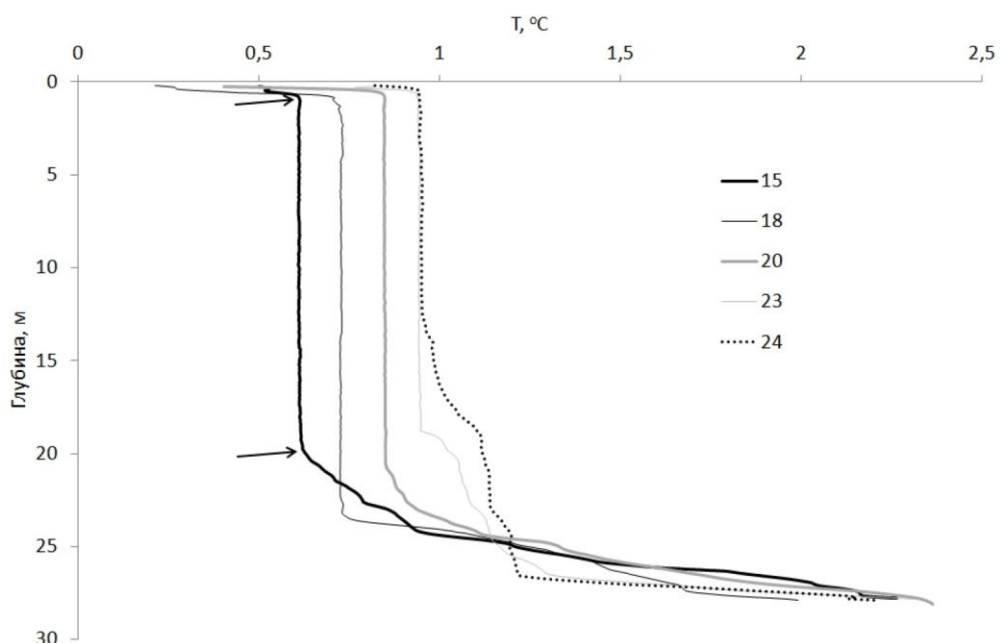


Рис. 1 Вертикальные температурные профили в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в период развития весенней подледной конвекции в марте 2015 г. Цифры - числа марта. Стрелками показаны верхняя и нижняя границы КПС.

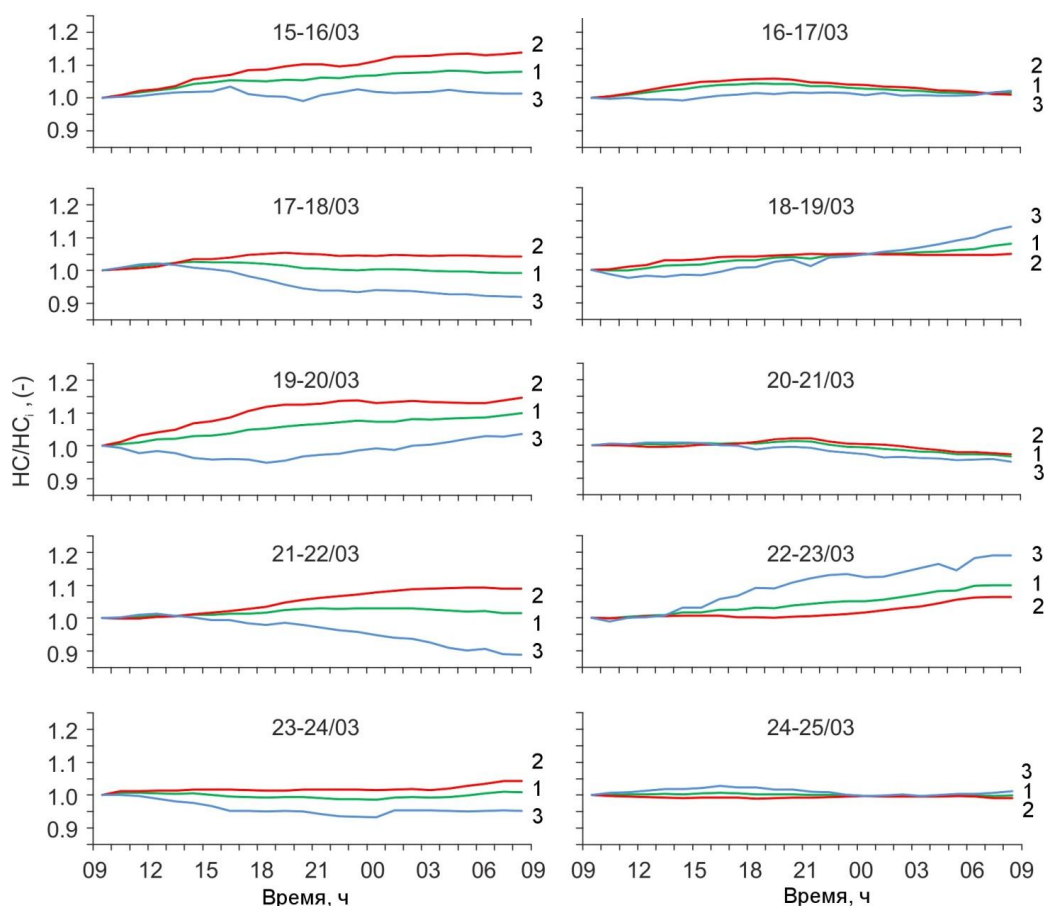


Рис. 2. Изменение теплосодержание слоев в течение суток, нормированное на значение в 9 утра. 1 – весь столб воды, 2 – КПС, 3 – стратифицированный слой.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Feel Foundation, “Fondation pour l'étude des eaux du Léman” (Швейцария).

Литература:

1. Филатов Н. Н. Совместный российско-швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер / Н. Н.Филатов, А. Ю. Тержевик // Труды КарНЦ РАН. – 2015. – №5. – С. 86-88.
2. Farmer D. M. Penetrative convection in the absence of mean shear / D. M. Farmer // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 1975. 101: 869–891.

**VERTICAL THERMAL STRUCTURE DURING THE DEVELOPMENT OF UNDER-ICE CONVECTION IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGA**

Tatiana Vladimirovna Efremova,  
Ph. D., Senior Researcher

Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS (NWPI)  
e-mail: [efremova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:efremova@nwpi.krc.karelia.ru)

Nikolay Innokentievich Palshin,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI

Roman Eduardovich Zdorovenov,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI

Mitrokhov Andrey Vasilievich,  
Senior Hydrologist NWPI

Galina Eduardovna Zdorovenova,  
Ph. D., acting as Head of Laboratory NWPI

Galina Gennadievna Gavrilenko,  
Graduate Student, Junior Researcher NWPI

Sergey Yurievich Volkov,  
Graduate Student, acting as Junior Researcher NWPI

Sergey Removich Bogdanov,  
Doctor of Science, Leading Researcher NWPI

Arkady Yurievich Terzhevnik,  
Ph. D., Leading Researcher NWPI

*Abstract:*The results of the analysis of temperature data during the development of the spring ice convection on Petrozavodsk bay of Lake Onego in March 2015 are given. It is shown that the thermal structure is formed under the effect of solar radiation heating a water column, and the dynamic processes, presumably internal waves in the stratified bottom layer, and an interaction with the surrounding waters of the bay.

*Keywords:* spring under-ice convection, temperature, heat content, Onego Lake



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМОДИНАМИКИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Илья Сергеевич Зверев,  
к.ф.-м.н., научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

e-mail: iliazverev@mail.ru

Константин Викторович Ушаков,  
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,  
ФГБУН «Институт вычислительной математики РАН»

e-mail: ushakovkv@mail.ru

Екатерина Александровна Шипунова,  
младший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

e-mail: shipunova@mail.ru

Сергей Дмитриевич Голосов,  
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

e-mail: sergey\_golosov@mail.ru

Рашит Ахметзиевич Ибраев,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН,  
ФГБУН «Институт вычислительной математики РАН»

e-mail: ibrayev@mail.ru

*Аннотация:* Представлены результаты моделирования термогидродинамических процессов в Ладожском озере с использованием модели гидродинамики внутреннего моря. Основное внимание уделено моделированию и анализу особенностей формирования полей температуры, течений и уровня озера. По результатам моделирования выполнены оценки возможного распространения примесей в Ладожском и Онежском озерах под воздействием различных атмосферных воздействий как гипотетических, так и реальных.

*Ключевые слова:* гидротермодинамика, моделирование, термическая фронтальная зона, атмосферное воздействие, распространение примеси

### **Введение**

Модель гидродинамики внутреннего моря (ГВМ, [1]) была адаптирована для использования ее в озерных условиях. Так, в частности, для учета наличия у пресной воды температуры максимальной плотности уравнение состояния морской воды было заменено на квадратичное уравнение состояния пресной воды. В качестве исходной метеорологической информации использовались данные реанализа NCEP/NCAR (совместный проект Национальных Центров Предсказания окружающей среды (NCEP) и Атмосферных Исследований (NCAR), США, <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>).

Для верификации модели использовались «климатические» (осредненные за вторую половину XX века) данные наблюдений за температурой воды в озере ([2]), метеорологические данные реанализа были соответствующим образом осреднены. Расчеты производились на сетке с пространственным разрешением 600×600 м по горизонтали и 30 горизонтов по вертикали. Шаг по времени составлял 6 минут.

**Распространение термической фронтальной зоны («термобара») в Ладожском озере по результатам моделирования.**

В качестве критерия адекватности модели реальным процессам были выбраны данные наблюдений за продвижением термической фронтальной зоны («термобара»), являющейся одним из самых сложных и важных с экологической точки зрения термогидродинамических явлений в

озере. В качестве формальной границы термобара было принято положение четырехградусной изотермы на поверхности озера, указывающей на зону опускания наиболее плотных вод ([2]).

Фронтальная зона зарождается в южной мелководной части озера и достаточно быстро продвигается в сторону увеличения глубины. В целом скорость продвижения термобара в южной мелководной части озера можно оценить как несколько сотен метров в сутки. При этом в глубоководной северной части озера скорость его продвижения значительно меньше – 100-200 м/сутки. Необходимо отметить, что расчетные и натурные данные хорошо согласуются друг с другом.

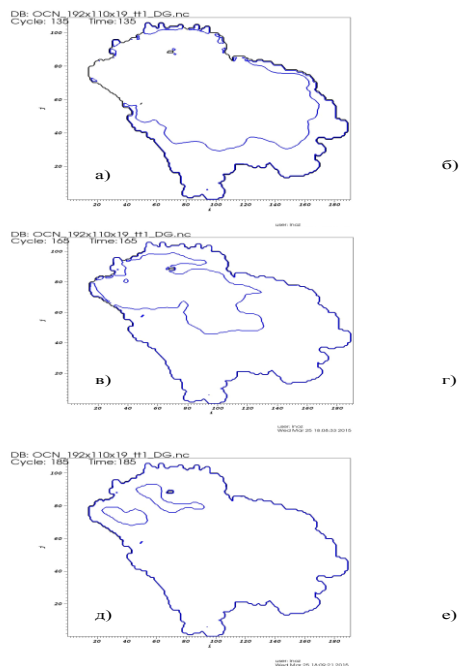


Рис. 1. Положение четырехградусной изотермы 15 мая, 15 июня и 5 июля в по расчетным (а, в, д,) и натурным (б, г, е) данным.

Расчетное положение фронтальной зоны во всех случаях практически совпадает с данными наблюдений. Модель также точно воспроизводит время исчезновения термобара – первая половина июля (рис. 1 д, е).

**Моделирование особенностей формирования полей течений, уровня озер, а также распространения примесей в них под воздействием различных гипотетических атмосферных воздействий.**

Серия тестовых расчетов на модели с имитацией различных вариантов атмосферных воздействий была посвящена исследованию влияния атмосферных процессов на формирование полей течений в озере, на связанные с циркуляцией водных масс колебания уровня воды, а также оценке возможных траекторий распространения примесей в акватории озер.

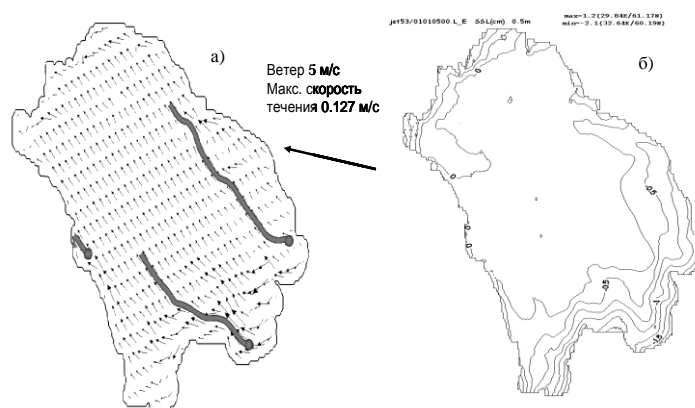
В первой серии численных экспериментов рассматривалось воздействие постоянного ветра, т.е. основным допущением было то, что ветер имеет постоянную скорость и направление в каждом узле расчетной сетки. Направление ветра изменялось в каждом отдельно взятом эксперименте. В еще двух экспериментах исследовалось воздействие на озеро атмосферной циркуляции различных типов – циклонического и антициклонического. В этих экспериментах направление и скорость ветра были переменными величинами в каждом узле расчетной сетки. Расчеты во всех экспериментах выполнялись на период в 30 суток с временным шагом 0.1 часа, шаг по пространству составлял 0.6 км. Во всех экспериментах оценивались скорость и направление возникающей в озере ветровой циркуляции. Кроме того полагалось, что в начальный момент в устьях притоков озера – реках Бурная, Волхов и Свирь – на поверхность происходили выбросы консервативной примеси, которая в течение последующих 30 суток распространялась по

акватории водоема. Возможные траектории распространения этих примесей также были оценены по результатам экспериментов.

*Эксперимент №1. Постоянный ветер восточного направления.*

Результаты моделирования поля течений, возникающего в Ладожском озере под воздействием постоянного по скорости (5 м/с) ветра восточного направления показали, что в озере образуется поверхностное течение преимущественно северо-западного направления. Скорость такого течения достигает 13 см/с. Максимальные скорости наблюдаются в юго-восточной части озера в районе Волховской губы. Минимальные отмечены вдоль западного берега озера. В соответствии со сложившейся картиной течений происходит и распространение примесей, которые за период расчета преодолели расстояние до 130 – 150 км в северо-западном направлении. Минимальное расстояние преодолела примесь, «выпущенная» в месте впадения р. Бурная. Именно там наблюдаются минимальные скорости течений (рис. 2 а, б).

Колебания уровня воды изменяются в соответствии с законами стонно-нагонных явлений. Падение уровня до 2 см наблюдается у юго-восточного берега озера, рост - у северного и северо-западного берегов.



*Рис. 2. Поле течений (стрелки) в поверхностном слое Ладожского озера и траектории распространения примесей (серые линии) при восточном ветре 5 м/с (а). Колебания уровня воды в озере при тех же условиях (б). Большая стрелка указывает направление ветра.*

*Эксперимент №2. Постоянный ветер северного направления.*

На рис. 3 а, б представлены результаты моделирования поля течений, возникающего в Ладожском озере под воздействием постоянного по скорости (5 м/с) ветра северного направления, траектории примесей и колебания уровня воды. При северном ветре на большей части акватории озера образуется поверхностное течение преимущественно юго-западного направления. Скорость такого течения достигает 15 см/с. Максимальные скорости наблюдаются вдоль восточного и западного берегов. Минимальные отмечены у северного берега озера. Картина распространения примесей кардинально отличается от картины, полученной в эксперименте №1. Сформировавшаяся циркуляция обеспечивает перенос примеси из Свирской губы в Волховскую с последующим «запиранием» ее там. Примесь, «выпущенная» в Волховской губе не имеет возможности для распространения в озеро.

Падение уровня до 2 см наблюдается у северного и северо-восточного берегов озера, рост до 3 см отмечается у южного и юго-восточного берегов.

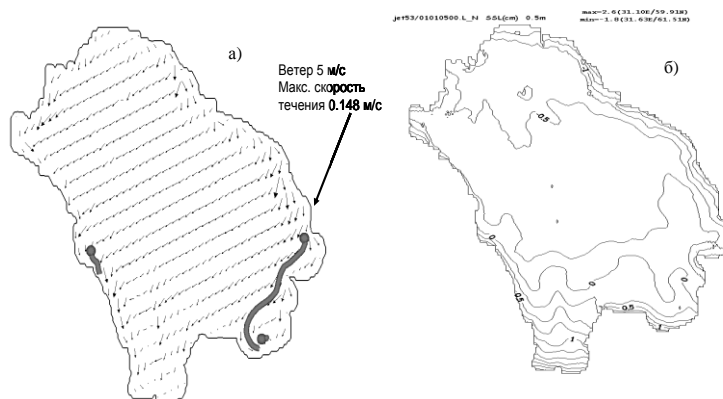


Рис. 3. То же, что и на рис. 2 при северном ветре 5 м/с.

*Эксперимент №3. Постоянный ветер южного направления.*

При южном постоянном по скорости (5 м/с) ветре на большей части акватории озера образуется поверхностное течение преимущественно северо-восточного направления (рис. 4 а). Скорость такого течения достигает 15 см/с. Максимальные скорости наблюдаются вдоль западного, юго-западного, а также вдоль восточного и северо-восточного берегов. Минимальные отмечены в бухте Петрокрепость, в Волховской и Свирской губ. Картина распространения примесей также существенно отличается от предыдущих экспериментов. На максимальное расстояние (практически до противоположного берега озера) распространяется примесь, «выпущенная» в месте впадения реки Бурной. Гораздо меньшие расстояния вдоль юго-восточного и восточного берегов проходят примеси из Волховской и Свирской губ. Падение уровня до 3 см наблюдается в бухте Петрокрепость, в Волховской губе и у юго-западного берега озера. Максимальный рост (до 1.5) происходит у северного и северо-восточного берегов (рис. 4 б).

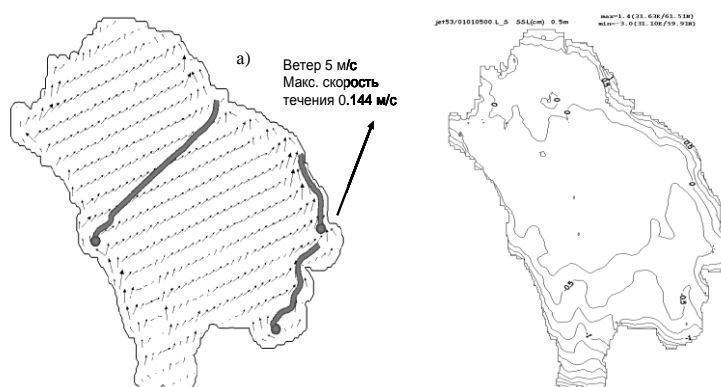


Рис. 4. То же, что и на рис. 2 при южном ветре 5 м/с.

*Эксперимент №4. Постоянный ветер западного направления.*

При западном ветре (5 м/с) на большей части акватории озера образуется поверхностное течение преимущественно юго-восточного направления со скоростью до 13-14 см/с (рис. 5 а).

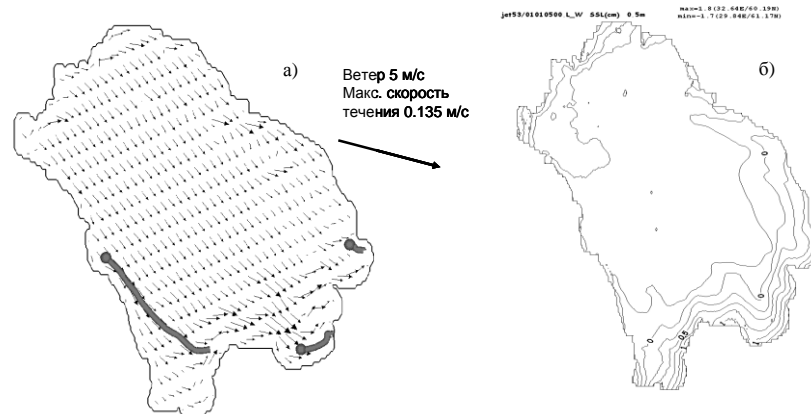


Рис. 5. То же, что и на рис. 2 при западном ветре 5 м/с.

Максимальные скорости наблюдаются в юго-восточной части озера, а именно – в Волховской губе. Минимальные скорости отмечены в бухте Петрокрепость. Картина распространения примесей также существенно отличается от предыдущих экспериментов. На максимальное расстояние (практически до бухты Петрокрепость) распространяется примесь, «выпущенная» в месте впадения реки Бурной. Как и в эксперименте № 2 примеси из Волховской и Свирской губ остаются на месте, не имея возможности для распространения в акваторию озера. Максимальный рост уровня до 2 см наблюдается в бухте Петрокрепость и в Волховской губе. Максимальное падение (до 1.5) происходит у западного и северо-западного берегов (рис. 5 б).

*Эксперимент №5. Переменная в пространстве атмосферная циркуляция циклонического типа.*

Для имитации переменного по величине и направлению ветрового воздействия на озеро было построено ветровое поле, в котором ветер направлен по касательной к концентрическим окружностям с центром, расположенном над центральным районом озера. При этом скорость ветра уменьшалась от внешней окружности к центру, где задавались нулевые значения скорости ветра.

При атмосферной циркуляции циклонического типа на большей части акватории озера также образуется поле течений циклонического типа с локальными завихрениями в бухте Петрокрепость, Волховской и Свирской губах (рис. 6 а). Максимальные скорости течений наблюдаются в юго-восточной и восточной прибрежных частях озера. Минимальные скорости отмечены в центральной части озера. Картина распространения примесей также соответствует циклонической циркуляции водной массы. Примеси из Волховской и Свирской губ распространяются вдоль береговой линии восточной части озера, примесь «выпущенная» у места впадения реки Бурной движется вдоль западного берега. В соответствии с полем течений максимальный рост уровня до 1.5 см наблюдается в юго-восточной и восточной частях акватории. Максимальное падение (до 1 см) происходит у западного и северо-западного берегов (рис. 6 б).

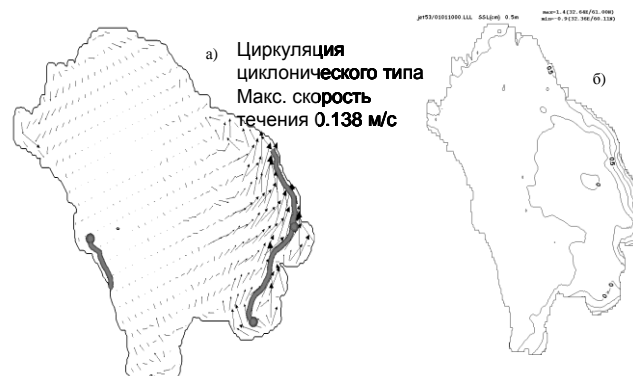


Рис. 6. Поле течений (стрелки) в поверхностном слое Ладожского озера и траектории распространения примесей (серые линии) при атмосферной циркуляции циклонического типа (а). Колебания уровня воды в озере при тех же условиях (б).

*Эксперимент №6. Переменная в пространстве атмосферная циркуляция антициклонического типа.*

При атмосферной циркуляции антициклонического типа на большей части акватории озера также образуется поле течений антициклонального характера (рис. 7 а).



*Рис. 7. То же, что и на рис. 6 при атмосферной циркуляции антициклонического типа*

Максимальные скорости наблюдаются в западной и северо-западной прибрежных частях озера. Минимальные скорости – до нулевых значений - отмечены в центральной части озера. Картина распространения примесей также соответствует антициклональному характеру циркуляции водной массы. Примесь из Свирской губы распространяются в направлении Волховской губы, примесь, «выпущенная» у места впадения реки Бурной движется через центр озера в северном и северо-восточном направлении, а примесь из Волховской губы остается на месте из-за локальной местной циркуляции.

В соответствии с полем течений максимальный рост уровня (рис. 7 б) до 1.5 см наблюдается в центральной части акватории. Незначительное падение (до 0.5 см) происходит вдоль береговой линии озера.

**Моделирование особенностей распространения примесей в Ладожском и Онежском озерах под воздействием среднеклиматических атмосферных воздействий.**

Специальная серия расчетов была посвящена оценке возможного распространения консервативной примеси в Ладожском и Онежском озерах под воздействием среднеклиматической атмосферы. В качестве примера расчетов на рис. 8 приведены результаты численных экспериментов со следующими условиями: постоянно действующие источники примеси 1-го января «помещались» в Волховской губе (Ладожское озеро) и в прибрежной части Петрозаводской губы в случае Онежского озера. Расчеты выполнялись на период целого года (365 суток) с временным шагом 0.1 часа и с пространственным разрешением 600x600 метров.

Распространение примеси в обоих озерах имеет как общие черты, так и свои особенности (рис. 8). Среди общих черт необходимо отметить то, что в обоих озерах в период ледостава (январь- май) примесь распространяется крайне неинтенсивно и локализуется, в основном в местах начального «выброса». Это, скорее всего, связано с отсутствием (из-за ледового покрова) прямого атмосферного воздействия на гидродинамические процессы. Необходимо отметить, что в зимние месяцы примесь из-за незначительного распространения накапливается в районе водозабора г. Петрозаводска (в случае Онежского озера). В случае же Ладожского озера в эти же зимние месяцы велика вероятность попадания примеси в район истока р. Невы с последующим ее переносом к водозаборам населенных пунктов, расположенных по течению реки вплоть до Санкт-Петербурга.

В летние месяцы в условиях прямого атмосферного воздействия примесь начинает интенсивно распространяться в обоих озерах. При этом основные направления распространения определяются вдольбереговыми течениями и топографией дна: в Онежском озере – это вдоль юго-западного берега, на котором расположен г. Петрозаводск, в Ладожском – вдоль восточного и северо-восточных берегов, что практически исключает ее попадание в бухту Петрокрепость, где расположен исток р. Невы.

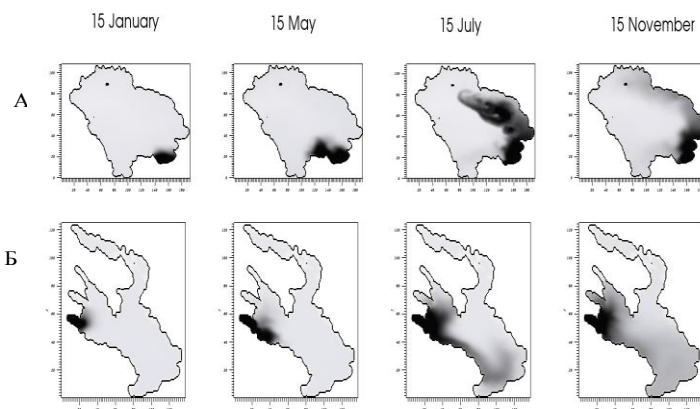


Рис. 8. Распространение консервативной примеси в озерах Ладожском (А) и Онежском (Б) на различные даты среднеклиматического года.

В период поздней осени - перед началом ледостава - интенсивность распространения примеси ослабевает. Однако, из-за обширного распространения в течение летних месяцев к началу зимнего периода наличие примеси наблюдается на обширных акваториях обоих озер.

### Заключение

При выполнении настоящей работы основное внимание было уделено моделированию и анализу особенностей формирования полей температуры, течений и уровня озер, а также распространения примесей в них под воздействием различных атмосферных воздействий как гипотетических, так и реальных. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. С использованием трехмерной математической модели гидродинамики внутреннего моря (ГВМ), выполнены расчеты по определению местоположения термической фронтальной зоны («термобара») в Ладожском озере в различные моменты времени. Результаты сопоставления расчетных данных с данными многолетних натуральных наблюдений показали, что модель способна вполне адекватно воспроизводить ГТД процессы в крупных озерах и является перспективным инструментом для изучения озер в условиях недостатка данных натуральных наблюдений.

2. Выполненные численные эксперименты по изучению влияния атмосферных воздействий различного вида на формирование циркуляции водной массы озера, колебаний уровня воды в озере, а также на возможные траектории распространения примесей, «выпущенных» в озеро в различных районах акватории показали, что модель на качественном уровне не только не противоречит данным многолетних натуральных наблюдений за течениями в озере, но и вполне им соответствует.

3. Результаты моделирования особенностей распространения консервативной примеси в Ладожском и Онежском озерах свидетельствуют, что в зависимости от места «выброса» и сезона года, примесь может накапливаться в местах водозаборов г. Петрозаводска и населенных пунктов, расположенных вдоль течения р. Невы вплоть до г. Санкт-Петербурга.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект №14–17–00740 «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях»).

### Литература:

1. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море / Р. А. Ибраев/ Москва: ГЕОС.– 2008. – 127 С.
2. Науменко М. А. Термический режим Ладожского озера / М. А. Науменко, В. А. Гузиватый, С. Г. Каретников // Ладога. – Санкт-Петербург: Нестор-История, – 2013. – С. 137-176.

## MODELING OF HYDROTHERMODYNAMICS OF LAKE LADOGA

Ilia Sergeevich Zverev,  
Ph.D, research scientist,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [iliazverev@mail.ru](mailto:iliazverev@mail.ru)

Konstantin Viktorovich Ushakov,  
Ph.D, senior research scientist,  
Institute of Numerical Mathematics RAS

e-mail: [ushakovkv@mail.ru](mailto:ushakovkv@mail.ru)

Ekaterina Alexandrovna Shipunova,  
research scientist,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [shipunova@mail.ru](mailto:shipunova@mail.ru)

Sergey Dmitriyevich Golosov,  
Ph.D, senior research scientist,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [sergey\\_golosov@mail.ru](mailto:sergey_golosov@mail.ru)

Rashit Akhmetziyevich Ibrayev,  
Dr. Sci., Fellow of RAS,  
Institute of Numerical Mathematics RAS

e-mail: [ibrayev@mail.ru](mailto:ibrayev@mail.ru)

*Abstract:* Results of modeling of hydrothermodynamics of Lakes Ladoga and Onego are presented. To perform numerical experiments the model of enclosed sea was applied. The main efforts were focused on the modeling of peculiarities of thermal processes, currents and admixture spreading in lakes under atmospheric forcing.

*Key words:* hydrothermodynamics, modeling, thermal bar, atmospheric forcing, admixture spreading



## ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В ПРИДОННЫХ ОБЛАСТЯХ ВОДОЕМОВ

Роман Эдуардович Здоровеннов,  
к.г.н., старший научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН

e-mail: [romga74@gmail.com](mailto:romga74@gmail.com)

Андрей Васильевич Митрохов,  
главный гидролог ИВПС КарНЦ РАН

Николай Иннокентьевич Пальшин,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН

Галина Эдуардовна Здоровеннова,  
к.г.н., и.о. заведующего лабораторией ИВПС КарНЦ РАН

Татьяна Владимировна Ефремова,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН

Аркадий Юрьевич Тержевик,  
к.т.н., ведущий научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН

*Аннотация:* Дано описание полезной модели – устройства для измерения температуры и концентраций растворенных газов в придонных областях водоемов. Приводятся рекомендации по постановке устройства в озеро и его модификациям для расширения возможностей применения.

*Ключевые слова:* измерения, градиентный метод, температура воды, растворенные газы, водоемы суши.

В последние десятилетия на фоне изменяющегося климата повышается уязвимость экосистем озер. Разработка методов прогноза сезонной изменчивости полей гидрофизических и химико-биологических характеристик, определяющих качество воды в водоемах суши, необходима для оценки состояния их экосистем. Важнейшими параметрами при этом являются температура воды, определяющая протекание многих химико-биологических процессов и концентрации растворенных газов, таких как кислород, а также так называемых парниковых газов – углекислого газа, метана, сероводорода. Как известно, большая часть произведенного метана окисляется метанотрофными бактериями на границе раздела вода-дно [3, 8]. Основными путями эмиссии газа из воды в атмосферу являются 1) образование пузырей в анаэробных донных отложениях [6]; 2) диффузионный поток через границу вода-воздух [11]; 3) поток из литоральных (прибрежных) донных отложений за счет разложения высшей водной растительности [10]; и 4) поток метана, накопленного в придонных анаэробных зонах в период летней стратификации и в период ледостава, возникающий при перемешивании водоема до дна после разрушения сезонного термоклина и после взлома льда [9]. Вклад каждого из этих источников в общеозерную эмиссию зависит от озерных характеристик (размера озера, типа стратификации, биогенной нагрузки, растительного покрова на водосборе и других; см. [4]).

Изучение физических механизмов переноса тепла и газов в водной толще как в период открытой воды, так и подо льдом имеет ключевое значение для понимания происходящих в озере разнообразных тепло- и газообменных процессов, а также прогнозирования динамики функционирования озерной экосистемы.

Для изучения потоков тепла и газов через поверхность дна водоемов может применяться достаточно простой градиентный метод. Например, расчет теплопотока по этому методу можно

осуществить как:  $Q_{bw} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$ , где  $Q_{bw}$  – теплопоток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент молекулярной теплопроводности среды;  $dT/dz$  – градиент температуры. В случае газа используют формулу

$F = D_{эф} \partial C / \partial z$ , где  $D_{эф}$  – эффективный коэффициент диффузии, зависящий от температуры и пористости грунтов;  $dC/dz$  – градиент концентрации газа.

Для получения оценок теплопотока или потоков газов по градиентному методу, измерения температуры или концентраций газов проводятся на близко расположенных горизонтах в придонной воде и верхнем слое грунтов. Градиентный метод простой, но очень чувствительный. Изменение запланированного расстояния между датчиками ( $dz$ ) на 1-2 см приводит к заметным ошибкам. Для получения достоверных оценок потоков тепла и газов требуется максимально точно определять расстояние между горизонтами измерений, необходимо обеспечить перпендикулярность измеряющих датчиков относительно поверхности раздела вода-дно и параллельность их друг другу – для наименьшего искажения запланированного расстояния между ними.

Полевой опыт показывает, что при постановке в водоем трудно контролировать и регулировать положение несущей конструкции в пространстве, и, как следствие, положение измерительных датчиков относительно границы вода-дно. Например, недостатком зонда для измерения профиля температуры в донных отложениях [2] можно считать отсутствие контроля вертикальности заглубления несущего стержня, что может приводить к искажению получаемых данных о пространственном распределении температуры.

В Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН было разработано и с успехом внедрено несколько модификаций автономной придонной платформы для измерения профиля температуры в придонных слоях воды и грунта [1].

Наиболее удачная запатентованная модификация платформы (патент РФ №153787 U1, авторы Митрохов А.В., Пальшин Н.И.) представляет собой треугольное основание и несущий металлический стержень с резьбой шарнирно прикрепленные к тросу с бумом. В нижней части стержня на уровне основания закреплен измерительный блок. Предусмотрена возможность перемещения блока по вертикали по резьбе. Блок состоит из металлической пластины с гнездами из материала с низкой теплопроводностью, в которые вертикально устанавливаются измерительные датчики, жестко закрепленные за середину корпуса. Основание выполнено из металлического профиля, поэтому время его погружения составляет всего 1-2 ч в отличие от известного прототипа, выполненного из пластика, время погружения которого превышает сутки [7]. Несущий стержень, шарнирно прикрепленный к тросу, под действием силы тяжести принимает вертикальное положение даже при существенных перекосах основания. Датчики сгруппированы вплотную друг к другу в центре конструкции, что сводит к минимуму их взаимное смещение в процессе длительных измерений и изменений положения основания. Таким образом, достигается и сохраняется положение датчиков на запланированных горизонтах, что существенно уменьшает ошибки последующих вычислений. Датчики давления, совмещенные с температурными, используются для точного определения глубин измерений. Нами использовались высокочувствительные датчики температуры и давления с логгерами канадской фирмы RBR Ltd. Большой запас элементов питания логгеров позволяет проводить измерения с дискретностью секунды-минуты в течение длительного времени порядка нескольких месяцев, что дает возможность исследовать динамику температуры придонного слоя воды и верхнего слоя донных отложений в течение года, включая малоизученные этапы замерзания озер и разрушения льда.

Постановка придонной платформы осуществляется в условиях открытой воды. С борта лодки она опускается на тросе до касания основанием дна. Длина троса подбирается таким образом, чтобы при постановке платформы на грунт буй располагался на глубине 2-3 м. Платформа должна обладать незначительной отрицательной плавучестью для обеспечения аккуратной постановки на грунт. Основание, выполненное из металлического профиля, играет роль якоря и ограничителя заглубления металлического стержня. Расположение датчиков в измерительном блоке, а также положение измерительного блока относительно основания подбираются таким образом, чтобы часть датчиков попадала в верхний слой донных отложений, а

часть – оставалась в придонном слое воды, для корректного расчета потоков через границу вода-дно.

В зависимости от задач исследования зона измерений расширяется путем увеличения длины измерительного блока, количества датчиков и сдвига между ними по вертикали. Это выгодно отличает нашу платформу от известного устройства для измерения профиля температуры придонного слоя воды и верхнего слоя донных отложений, состоящего из основания в виде треугольной рамы, соединенного с вертикальным стрижнем, по которому свободно перемещается с помощью штатива измерительный зонд длиной 21 см, внутри корпуса которого равномерно распределены 16 температурных датчиков. К раме прикреплена видеочкамаера для контроля заглубления зонда [5]. Недостатком устройства является то, что зона измерений температуры ограничена длиной зонда, что снижает информативность получаемых сведений о температуре придонных слоев воды и верхнего слоя донных отложений.

Кроме того, на нашей платформе, наряду с температурными датчиками, в зависимости от задач исследования, могут использоваться другие, например, датчики растворенного кислорода или других газов (углекислый газ, метан). Это позволит с высоким пространственно-временным разрешением проследить за потоками газов через поверхность донных отложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 16-05-00436А и 14-05-91761АФ-а.

#### Литература:

1. Гавриленко Г. Г. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере / Г. Г. Гавриленко, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов, Н. И. Пальшин, А. В. Митрохов, А. Ю. Тержевик // Труды КарНЦ РАН. – Серия Лимнология. – 2015. – №9. – С. 3-9.
2. Патент РФ 70995, МПК G01N33/18, опубл. 20.02.2008.
3. Bastviken D. Measurement of methane oxidation in lakes—A comparison of methods/ D. Bastviken, J. Ejlerstsson, L. Tranvik // Environ. Sci. Technol. –2002. – 36. – P. 3354-3361.
4. Bastviken D. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate / D. Bastviken, J. Cole, M. Pace, L. Tranvik // Global Biogeochem. Cycles. – 2004. – 18. –GB4009. – doi:10.1029/2004GB002238
5. Bernhardt J. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations / J. Bernhardt, G. Kirillin, M. Hupfer // Limnology and Oceanography: Fluids and Environments. – 2014. – №4. – P. 1-17. – DOI 10.1215/21573689
6. Fendinger N. J. The role of gas ebullition in the transport of organic contaminants from sediments / N. J. Fendinger, D. D. Adams, D. E. Glotfelty // Sci. Total Environ. – 1992. – 112. – P. 189-201.
7. Kirillin G. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany / G. Kirillin, C. Engelhardt, S. Golosov, T. Hintze // Aquatic Ecology. – 2009. – 43. – P. 641-651. – DOI 10.1007/s10452-009-9274-3.
8. Liikanen A. Methane cycling in the sediment and water column of mid-boreal hyper-eutrophic Lake Kevaton, Finland / A. Liikanen, J. T. Huttunen, K. Valli, P. J. Martikainen // Arch. Hydrobiol. – 2002. – 154. – P. 585-603.
9. Michmerhuizen C. M. Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt / C. M. Michmerhuizen, R. G. Striegl, M. E. McDonald // Limnol. Oceanogr. – 1996. – 41. – P. 985-991.
10. Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes / R. Segers // Biogeochemistry, 1998. 41, 2– 51, doi:10.1023/A:1005929032764.
11. Stumm W. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, / W. Stumm, J. J. Morgan. 1996. 1022 pp. John Wiley, New York.

## HIGH-PRECISION MEASUREMENTS OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF DISSOLVED GASES IN THE BOTTOM LAYERS OF RESERVOIRS

Roman Eduardovich Zdrovennov,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS (NWPI)  
e-mail: [romga74@gmail.com](mailto:romga74@gmail.com)  
Andrey Vasilievich Mitrokhov,  
Senior Hydrologist NWPI  
Nikolay Innokentievich Palshin,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Galina Eduardovna Zdrovennova,  
Ph. D., acting as Head of Laboratory NWPI  
Tatiana Vladimirovna Efremova,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Arkady Yurievich Terzhevnik,  
Ph. D., Leading Researcher NWPI

*Abstract:* Description of the utility model, i.e. a device to measuring the temperature and the dissolved gas concentrations in the bottom areas of water bodies is given. Recommendations for the device deployment in the lake and its modifications to extend the application possibilities are given.

Keywords: measurements, the gradient method, water temperature, dissolved gases, reservoirs

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Галина Эдуардовна Здоровеннова,  
к.г.н., и.о. заведующего лабораторией ИВПС КарНЦ РАН  
e-mail: [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)  
Роман Эдуардович Здоровеннов,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Николай Иннокентьевич Пальшин,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Татьяна Владимировна Ефремова,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Сергей Юрьевич Волков,  
аспирант, и.о. младшего научного сотрудника ИВПС КарНЦ РАН  
Галина Геннадиевна Гавриленко,  
аспирант, младший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Богданов Сергей Рэмович,  
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Тержевик Аркадий Юрьевич,  
к.т.н., ведущий научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН

*Аннотация:* Приводятся результаты анализа данных длительных измерений температуры и концентраций хлорофилла «а» по четырем группам фитопланктона (зеленые, диатомовые, сине-зеленые и криптофитовые) в Петрозаводской губе Онежского озера в марте 2015 г. Показана внутрисуточная и синоптическая изменчивость распределения хлорофилла «а» по водному столбу на фоне развития весенней подледной конвекции.

*Ключевые слова:* весенняя подледная конвекция, хлорофилл «а», фитопланктон, Онежское озеро, период ледостава

Зимой в покрытых льдом озерах низкий уровень освещенности, близкие к нулю температуры воды и наличие питательных веществ лимитируют первичное продуцирование [2]. Весной, по мере таяния снега и увеличения потока солнечной радиации, проникающей под лед, интенсифицируется фотосинтез [6]. Активное развитие фитопланктона может существенно снижать прозрачность подледного слоя воды [8, 9]. Весеннее подледное цветение планктона во многом определяет развитие планктонного сообщества в предстоящем сезоне открытой воды. Предположительно суточные миграции планктона испытывают влияние восходящих и нисходящих токов конвективных ячеек [3-5].

Динамика содержания хлорофилла «а» в Петрозаводской губе Онежского озера в период развития весенней подледной конвекции исследовалась в рамках международного междисциплинарного проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений», поддержанного фондом ЭЛЕМО (Швейцария) [1].

Измерение суммарной концентрации хлорофилла «а» и по четырем группам фитопланктона (зеленые, сине-зеленые, диатомовые и криптофитовые) проводилось в период весенней подледной конвекции 14-25 марта 2015 г. в центральной части акватории Петрозаводской губы Онежского озера. Использовался зонд Fluoro-probe фирмы bbe-mondaenke, Германия. Зондирования водной толщи от поверхности до дна (глубина в месте измерений 27 м) проводились со льда каждый час круглосуточно. Дискретность измерений по вертикали изменялась от 0.2 до 0.5 м. Параллельно проводились измерения температуры водной толщи зондом STD-90M. В период измерений нижняя граница конвективно-перемешанного слоя (КПС) находилась на глубине около 20 м.

Отмечалось изменение положения нижней границы КПС в течение суток – заглубление в дневные часы и уменьшение ее глубины в ночные.

Почасовые зондирования в течение более чем 10 суток позволили проследить внутрисуточную и синоптическую изменчивость концентраций хлорофилла «а» в водном столбе в центральной части Петрозаводской губы.

Суммарная концентрация хлорофилла «а» в водном столбе была распределена относительно равномерно от поверхности до дна, составляла в среднем 0.4-0.5 мгк/л, с выбросами до 1.8 мгк/л в верхнем 5-м слое водного столба в дневные часы (рис.1,2). Верхний слой воды в дневные часы достаточно освещен для того, чтобы обеспечить энергией процесс фотосинтеза. Восходящие и нисходящие конвективные токи приводят к выравниванию концентрации хлорофилла «а» по вертикали. Когда толщина КПС становится больше глубины фотической зоны, клетки водорослей переносятся конвективными движениями в зону с низкой освещенностью. В вечерние и ночные часы (20:00-8:00) периодически наблюдалось увеличение концентраций хлорофилла "а" на нижней границе КПС (17-23 м), по всей видимости, связанное с тем, что, по мере затухания восходящих токов в конвективных ячейках, часть клеток планктона, не способного к самостоятельным движениям, оседала под действием силы тяжести.

В период измерений по концентрациям хлорофилла «а» доминировали зеленые водоросли, второе место занимали криптофитовые (рис. 1, 2). В первые дни измерений концентрация хлорофилла «а» диатомовых водорослей была пренебрежимо мала, однако заметный ее рост произошел после 20 марта. Концентрация хлорофилла «а» сине-зеленых водорослей была минимальной.

Некоторые факты, полученные в результате анализа данных, свидетельствуют о наличии агрегации водорослей в конвективных ячейках. Повышенные концентрации хлорофилла «а» сине-зеленых водорослей за дневные часы всегда наблюдались в поверхностных слоях. Концентрации криптофитовых водорослей в большинстве случаев уменьшались с глубиной. Между концентрациями хлорофилла «а» зеленых и диатомовых водорослей в КПС обычно наблюдалась обратная зависимость. Клетки сине-зеленых водорослей часто наблюдались там, где отсутствовали диатомовые, и наоборот. Такой же тип зависимостей имел место для сине-зеленых и криптофитовых водорослей, несмотря на то, что количество клеток обоих видов водорослей в КПС уменьшалось с глубиной. Подобные факты косвенно свидетельствуют о том, что в период развитой подледной конвекции происходит рандомизация в распределениях видов фитопланктона, обусловленная их способностью к самостоятельному передвижению, подобно тому, как в вихрях Ленгмюра наблюдаются повышенные концентрации водорослей с положительной плавучестью в верхних частях зон опускания воды, а водорослей с отрицательной плавучестью – в зонах подъема воды [7], в то время как водоросли с нейтральной плавучестью захватываются движениями воды и распределяются относительно равномерно.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Feel Foundation, “Fondation pour l'étude des eaux du Léman” (Швейцария).

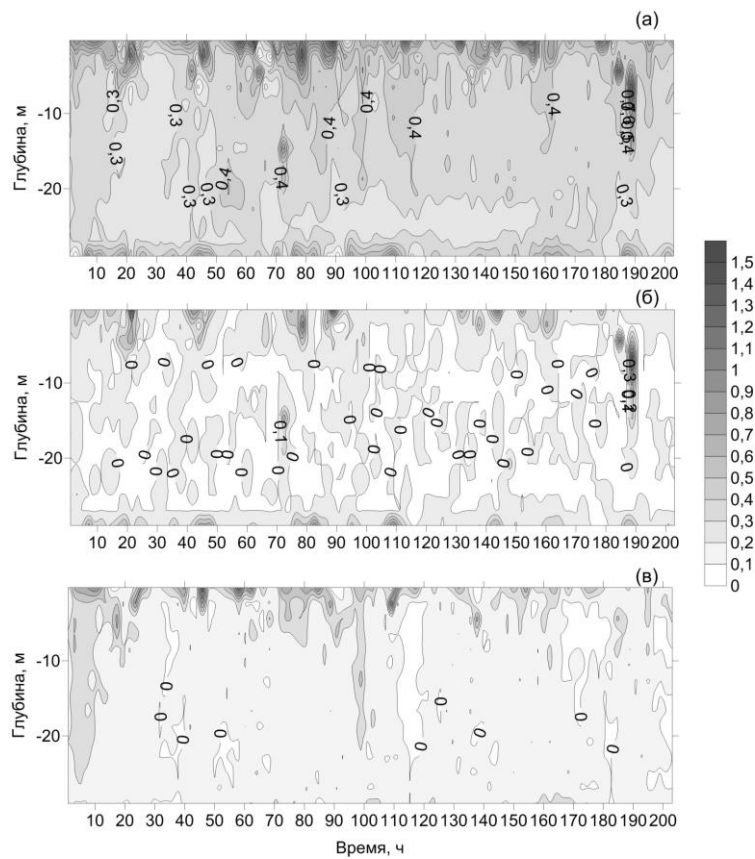


Рис. 1. Концентрации суммарного хлорофилла «а» (а), зеленых (б) и криптофитовых (в) водорослей в период с 14 ч 19 марта 2015 г. по 12 ч 25 марта 2015 г. в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера.

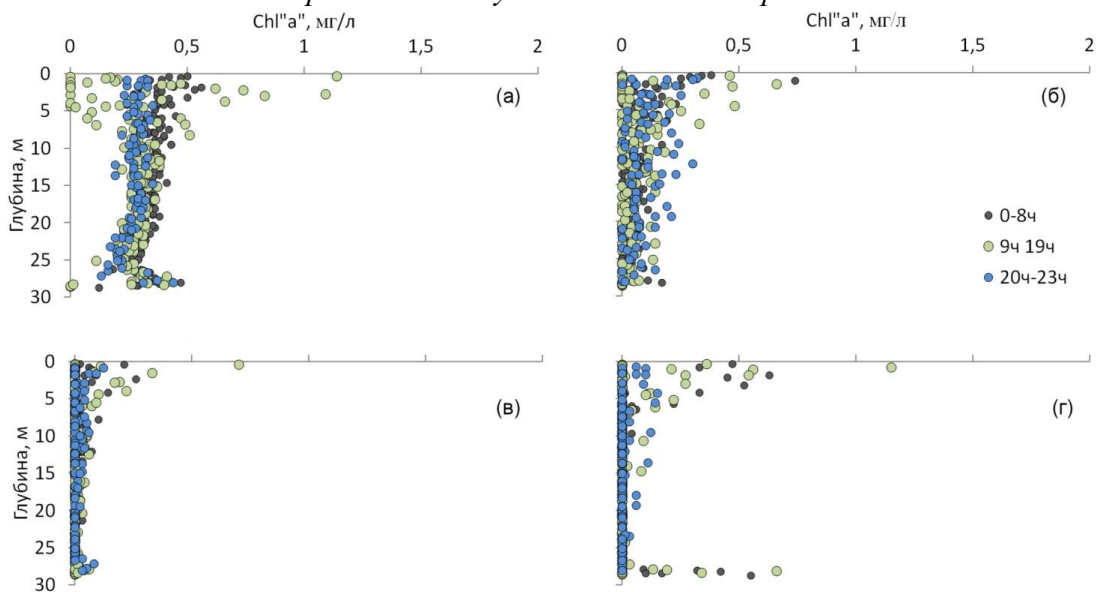


Рис. 2. Концентрации хлорофилла «а» зеленых (а), криптофитовых (б), диатомовых (в) и сине-зеленых (г) водорослей 20 марта 2015 г. в ночные, дневные и вечерние часы в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера.

Литература:

1. Филатов Н. Н. Совместный российско-швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер / Филатов Н. Н., А. Ю. Тержевик // Труды КарНЦ РАН. – 2015. – №5. – С. 86-88.

2. Bertilsson S. The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes / S. Bertilsson, A. Burgin, C. C. Carey, S. B. Fey, H.-P. Grossart, L. M. Grubisic, I. D. Jones, G. Kirillin, J. T. Lennon, A. Shade, R. L. Smyth // *Limnol. Oceanogr.* – 2013. – 58(6) – P. 1998-2012.
3. Hobbie J. E. Arctic limnology: a review. *Alaskan Arctic Tundra* / J. E. Hobbie –Arctic Institute of North America, Tech. Pap. – № 25 – M. E. Britton Ed. –1973. – P. 127–168.
4. Jewson D. H. Effect of snow depth on under-ice irradiance and growth of *Aulacoseira baicalensis* in Lake Baikal / D. H. Jewson, N. G. Granin, A. A. Zhdarnov, R. Yu. Gnatovsky // *Aquat. Ecol.* – 2009. – 43. – P. 673-679.
5. Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension / D.E. Kelley // *J. Plankton. Res.* – 1997. – V.19. – P. 1859–1880.
6. Maeda O. On the high density of a phytoplankton population found in a lake under ice / O. Maeda, S. Ichimura // *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* – 1973. – 58. – P. 473-485.
7. Reynolds C. S. *The Ecology of Phytoplankton* / C.S. Reynolds. New York: Cambridge Univ. Press, 2006. 535 p.
8. Ventelä A. M. Vertical and seasonal distributions of microorganisms, zooplankton and phytoplankton in a eutrophic lake / A. M. Ventelä, V. Saarikari, K. Vuorio // *Hydrobiologia.* – 1998. – 363. – P. 229–240.
9. Wright R. Dynamics of a phytoplankton community in an ice-covered lake / R. Wright // *Limnol. Oceanogr.* – 1964. – 9(2). – P. 163-178.

#### **DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL "A" IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO DURING UNDER-ICE CONVECTION**

Galina Eduardovna Zdorovenнова,  
Ph. D., acting as Head of Laboratory Northern water problems  
Institute Karelian Research Center of RAS (NWPI)  
e-mail: zdorovennova@gmail.com  
Roman Eduardovich Zdorovenнов,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Palshin Nikolay Innokentievich,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Tatiana Vladimirovna Efremova,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Volkov Sergey Yurievich, Graduate Student,  
acting as Junior Researcher NWPI  
Galina Gennadievna Gavrilenko,  
Graduate Student, Junior Researcher NWPI  
Bogdanov Sergey Removich,  
Doctor of Science, Leading Researcher NWPI  
Arkady Yurievich Terzhevnik,  
Ph. D., Leading Researcher NWPI

*Abstract:* The results of the analysis of long-term measurements of water temperature and chlorophyll "a" of four groups of phytoplankton (green, diatoms, blue-green, cryptophytes) in Petrozavodsk Bay of Onego Lake during the under ice convection in March 2015 are given. Diurnal and synoptic variability in the vertical distribution of chlorophyll "a" on the background of the spring under-ice convection is shown.

*Keywords:* spring under-ice convection, chlorophyll "a", phytoplankton, Onego Lake, ice-period



## РЕЗУЛЬТАТЫ 70-ЛЕТНИХ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

- Евгений Анатольевич Зилов,  
д.б.н., ведущий научный сотрудник  
НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [eugenetilow@gmail.com](mailto:eugenetilow@gmail.com)
- Людмила Степановна Кращук,  
к.б.н., научный сотрудник  
НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [Krashchuk@gmail.com](mailto:Krashchuk@gmail.com)
- Константин Алексеевич Онучин,  
аспирант кафедры зоологии б/п и гидробиологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [kontantinonuchin@gmail.com](mailto:kontantinonuchin@gmail.com)
- Елена Васильевна Пислегина  
к.б.н., научный сотрудник  
НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [Helga\\_64@mail.ru](mailto:Helga_64@mail.ru)
- Ольга Олеговна Русановская  
к.б.н., научный сотрудник  
НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [rusanovskaya-o.o@mail.ru](mailto:rusanovskaya-o.o@mail.ru)
- Светлана Владимировна Шимараева,  
к.б.н., заведующий лабораторией общей гидробиологии  
НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: [shimaraeva@gmail.com](mailto:shimaraeva@gmail.com)

*Аннотация:* По наблюдениям за состоянием планктона с 1945 г., его общее состояние в целом стабильно, хотя отмечаются и некоторые тренды. В фитопланктоне возрастает численность мелкоклеточных космополитных видов, массовых в конце лета – осенью; уменьшается численность крупноклеточных эндемичных видов, вегетирующих подо льдом. В зоопланктоне растёт численность не эндемиков — кладоцер и летне-осенних коловраток, снижается численность эндемичных подледных и не эндемичных круглогодичных коловраток.

*Ключевые слова:* Озеро Байкал, планктон, фитопланктон, зоопланктон, многолетняя динамика

Уникальные качества чистоты байкальской воды обеспечиваются работой экологической системы озера – «фабрики чистой воды». В озере Байкал, благодаря его размерам и форме, как и в Мировом Океане, 90% кругооборота веществ осуществляется за счёт 95% потока энергии через экологическую систему толщи воды озера, т.е., через пелагическую экосистему (население толщи воды) [1].

С февраля 1945 года и по настоящее время учёные НИИ биологии Иркутского государственного университета выполняют уникальный проект долговременного экологического мониторинга планктона озера Байкал.

Отбор проб ведется еженедельно круглогодично на «точке №1», расположенной в Южном Байкале, напротив поселка Большие Коты (51°52'48" с.ш., 105°05'02" в.д., расстояние 2,7 км от берега, над глубиной 800 м.). Фитопланктон отбирается батометром с глубин 0, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250 м, учет водорослей ведется в лаборатории с помощью светового микроскопа (учитывается 439 форм фитопланктона). Зоопланктон отбирается закрывающейся сетью Джели с

диаметром входного отверстия 37,5 см из мельничного газа с ячейей диаметром 0,1 мм из слоев 0-25, 25-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-250 м, пробы фиксируются формалином, учёт зоопланктона ведется также в лаборатории с помощью микроскопа (учитывается 774 формы зоопланктона). Температура воды на глубинах 0, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250 м измеряется термометром, вмонтированным в батометр. Прозрачность определяется по белому диску Секки.

Накопленный массив данных не имеет себе равных как по долговременности наблюдения, (на 20-30 лет длиннее любых других аналогичных рядов наблюдений), так и по разрешению (30-50 отборов проб в год, по сравнению с обычными 5-12 отборами). Так, близкие к байкальскому проекту, аналогичные долготлетние исследования на оз. Мичиган начались в 1957 г. и основывались на взятии проб один раз в два месяца (сейчас ежемесячно), аналогичные исследования на озера Киннерет проводятся с 1967 г., Женевского озера - с 1974 г. (ежемесячно) [12-14,21].

За эти годы удалось установить многое о функционировании планктона озера Байкал [1,4,5,11]. Еще В.Н. Яснитским [7,8] была установлена, а М.М. Кожовым [2,3] окончательно подтверждена чрезвычайная межгодовая вариабельность подледного «цветения» фитопланктона – регулярные вспышки развития фитопланктона, происходящие подо льдом, с периодом в 4-5 лет. Причины этих подледных вспышек планктона до настоящего времени остаются до конца так и не понятыми. В такие годы биомасса водорослей достигает 4–6 г м<sup>-3</sup>. В неурожайные годы максимальная биомасса не превышает десятых долей г м<sup>-3</sup>. Циклические межгодовые колебания численности фитопланктона с большой амплитудой, отмеченные в 1950-е гг. для видов рода мелозира (ныне *Aulacoseira*), оказались свойственны и другим пелагическим водорослям озера [6, 10]. Развитие зоопланктона также отличается нерегулярностью и урожайные по фитопланктону годы сопровождаются либо урожайными по зоопланктону, либо нет. Именно чрезвычайная вариабельность межгодовых колебаний численностей и биомасс порождает опасность ошибочных оценок направлений трендов численностей планктона [6].

В целом численность байкальских планктонтов колеблется вокруг своих среднесноголетних значений, но, тем не менее, многолетние данные позволяют с большой долей уверенности говорить о том, что в планктонном сообществе наблюдаются тенденции:

В фитопланктоне:

возрастает численность мелкоклеточных космополитных видов, массовых в конце лета–осенью (*Monoraphidium irregulare*, *Koliella longiseta*, *Chrysochromulina parva*, *Dynobryon cylindricum*, *Dynobryon sociale*, *Rhodomonas pusilla*);

уменьшается численность крупноклеточных эндемичных видов, вегетирующих подо льдом (*Gymnodinium baicalense*, *Aulacoseira scvorzowii*, *Aulacoseira baicalensis*, *Stephanodiscus meyeri*, *Cyclotella baicalensis*).

В зоопланктоне:

растёт численность не эндемиков — клadoцер *Daphnia longispina*, *Bosmina longirostris*, и летне-осенних коловраток (*Conochilus unicornis*, *Synchaeta stylata*, *Synchaeta grandis*, *Asplanchna priodonta*, *Asplanchna herricki*, *Collotheca mutabilis* и др.),

снижается численность эндемичных подледных (*Synchaeta pachypoda*, *Synchaeta pachypoida*, *Synchaeta prominula*, *Notholca grandis*, *Notholca intermedia*) и круглогодичных не эндемичных коловраток (*Keratella quadrata*, *Keratella cochlearis*, *Kellicottia longispina*, *Filinia terminalis*).

Данные тренды могут быть следствиями разных причин:

Первая, и наиболее вероятная: наблюдаемые колебания численности планктонтов являются природными флюктуациями или частью неких долговременных автоколебательных процессов в экосистеме озера.

Вторая, достаточно вероятная: тренды – продукт глобальных изменений климата. На многих других водоёмах также наблюдаются многочисленные примеры роста численности мелкоклеточного фитопланктона, мелких коловраток, клadoцер, снижения численности крупноклеточного фитопланктона [9,12-14,18-21].

Третья, не вполне вероятная: тренды – следствие регионального загрязнения. Они практически совпадают с предсказанными в 1990-е-2000-е годы изменениями в экосистеме Байкала, индуцированными химическим загрязнением озера [15-17].

Учитывая, что в современной науке нет другого, сколько-нибудь близкого по объему и длительности наблюдений массива данных, полученные в мониторинге материалы имеют глобальное значение для международного научного и экспертного сообщества. В особенности они необходимы при принятии таких решений, как формирование глобальной и региональной политики в области климатических изменений, при планировании и организации мероприятий по сбалансированному природопользованию и охране окружающей среды. Состояние планктонных сообществ озера Байкал является не только ключевым показателем всей сложной экосистемы Байкала, но и, в свою очередь, может служить и важнейшим индикатором состояния биосферы всей планеты. Если планктон гигантского озера Байкал (инерционной и консервативной системы), испытывает изменения в силу глобальных процессов, то это говорит о том, что изменения не только существуют, но и то, что они чрезвычайно масштабны.

#### Литература:

1. Байкаловедение: в 2 кн. - Новосибирск: Наука. 2012. - Кн. 2. - 610 с.
2. Кожов М. М. К познанию планктона в оз. Байкал / М. М. Кожов // Изв. БГНИИ при ИГУ. – 1948. – Т. 10, вып. 2. – С. 4–26.
3. Кожов М. М. Сезонные и годовые изменения в планктоне озера Байкал / М. М. Кожов // Труды Всесоюзн. Гидробиол. об-ва. – 1955. – Т. 6. – С. 133–157.
4. Кожов М. М. Биология озера Байкал / М. М. Кожов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 316 с.
5. Кожов М. М. Очерки по байкаловедению / М. М. Кожов. – Иркутск: Вост.-Сиб. книж. изд-во, 1972. – 254 с.
6. Кожова О. М. Экологический мониторинг Байкала / О. М. Кожова, А. М. Бейм. – М.: Экология, 1993. – 351 с.
7. Яснитский В. Н. Материалы к познанию планктона озера Байкал / В. Н. Яснитский // Тр. Иркут.о-ва естествоиспыт. – 1923. – Т. 1, вып. 1. – С. 31-74.
8. Яснитский В. Н. Результаты наблюдений над планктоном Байкала в работах Биологической станции за 1926–1928 гг. / В. Н. Яснитский // Изв. Биол.–геогр. н.–иссл. инст. при Иркутск.унив. – 1930. – Т. 4, Вып. 4. – С. 191–238.
9. Adrian R. Lakes as sentinels of climate change / R. Adrian, C. O'Reilly, H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller, D. M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. A. Weyhenmeyer, M. Winder // *Limnol. Oceanogr.* – 2009. – V. 54, N6 (2). – P. 2283–2297.
10. Kozhova O. M. Phytoplankton of Lake Baikal: Structural and Functional Characteristics / O. M. Kozhova // *Arch. Hydrobiol.* – 1987. – V. 25. – P. 19-37.
11. Kozhova O. M, L R. Izmet'yeva (Eds.) Lake Baikal: Biodiversity and Evolution. - Leiden: Backhuys Publishers, 1998. – 447 p.
12. Molinero J. K. Anthropogenic and climate forcing on the long-term changes of planktonic rotifers in Lake Geneva / J.K. Molinero, O. Anneville, S. Souissi, G. Balvay, D. Gerdeaux // *Europe Journal of Plankton Research.* - 2006. – V. 28, N 3. – P. 287–296.
13. Parker B. R. Recent climate extremes alter alpine lake ecosystems / B. R. Parker, R. D. Vinebrooke, D. W. Schindler // *Proceedings of National Academy of Sciences.* – 2008. - V. 105, N 35. – P. 12927–12931.
14. Schindler D. W. Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes / D. W. Schindler // *Limnol. Oceanogr.* – 2009. - V. 54, N6 (2). – P. 2349–2358.
15. Silow E. A. Mathematical models of lake Baikal ecosystem / E. A. Silow, V. J. Gurman, D. J. Stom, D. M. Rosenraukh, V. I. Baturin // *Ecological Modelling.* – 1995. – Vol. 82. – P. 27 – 39.
16. Silow E. A. The use of two lumped models for the analysis of consequences of external influences on the lake Baikal ecosystem / E. A. Silow // *Ecological Modelling.* – 1999. – Vol. 121. – P. 103 – 113.

17. Silow E. A. Prediction of Lake Baikal ecosystem behaviour using an ecosystem disturbance model / E. A. Silow, V. A. Baturin, D. J. Stom // Lakes & Reservoirs: Research and Management. – 2001. – Vol. 6, N 1. – P. 33–36.
18. Weyhenmeyer G. A. Increasingly Ice-Free Winters and Their Effects on Water Quality in Sweden's Largest Lakes / G. A. Weyhenmeyer, A.-K. Westü, E. Willen // Hydrobiologia. – 2008. - V. 599, N 1. - P. 111–118.
19. Winder M. Temporal Organization of Phytoplankton Communities Linked To Physical Forcing / M. Winder, D. A. Hunter // Oecologia. – 2008. - V. 156, N 1. - P. 179–192.
20. Winder M. Lake Warming Favours Small-Sized Planktonic Diatom Species / M. Winder, J. E. Renter, S. G. Schladow // Proc. Royal Soc. B. – 2008. - V. 276, N 1656. - P. 427–435.
21. Williamson C. E. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change / C. E. Williamson, J. E. Saros, W. F. Vincent, J. P. Smol // Limnol. Oceanogr. – 2009. - V. 54, N6 (2). – P. 2273–2282.

## **RESULTS OF 70-YEARS AQUATIC ECOLOGY OBSERVATIONS AFTER THE LAKE BAIKAL PLANKTON**

Eugene Anatolievich Silow,  
Dr. Sci., leading research fellow  
Institute of Biology Irkutsk State University  
E-mail: [eugenasilow@gmail.com](mailto:eugenasilow@gmail.com)

Lyudmila Stepanovna Krashchuk,  
Ph. D, research fellow  
Institute of Biology Irkutsk State University  
E-mail: [Krashchuk@gmail.com](mailto:Krashchuk@gmail.com)

Konstantin Alexeevich Onuchin,  
PhD-student of chair of invertebrate  
zoology and aquatic biology  
Irkutsk State University  
E-mail: [kontantinonuchin@gmail.com](mailto:kontantinonuchin@gmail.com)

Elena Vasilievna Pislegina  
Ph. D, research fellow  
Institute of Biology Irkutsk State University  
E-mail: [Helga\\_64@mail.ru](mailto:Helga_64@mail.ru)

Olga Olegovna Rusanovskaya  
Ph. D, research fellow  
Institute of Biology Irkutsk State University  
E-mail: [rusanovskaya-o.o@mail.ru](mailto:rusanovskaya-o.o@mail.ru)

Svetlana Vladimirovna Shimaraeva  
Ph. D, Head of general aquatic biology laboratory  
Institute of Biology Irkutsk State University  
E-mail: [shimaraeva@gmail.com](mailto:shimaraeva@gmail.com)

*Abstract:* According to results of observations since 1945 the state of plankton community is relatively stable, though there are some trends observed. Increase of small cell species number, developing in summer and decrease of large cell endemic species number, developing under ice in phytoplankton. Increase of non-endemic species of cladocers and summer rotifers number, decrease of number of non-endemic year round rotifers and endemic under ice rotifers.

*Key words:* Lake Baikal, plankton, phytoplankton, zooplankton, long-term dynamics

## ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЕГО КОМПОНЕНТЫ В БОЛЬШИХ И МАЛЫХ ОЗЕРАХ КАРЕЛИИ

Мария Владимировна Зобкова,  
главный химик ИВПС КарНЦ РАН,  
e-mail: rincalika21@yandex.ru  
Татьяна Алексеевна Ефремова,  
младший научный сотрудник, efremova.nwpi@mail.ru  
Петр Александрович Лозовик,  
д.х.н., заведующий лаб. гидрохимии и гидрогеологии  
ИВПС КарНЦ РАН,  
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru  
Альбина Васильевна Сабылина,  
к.х.н, старший научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН

*Аннотация:* Рассмотрено содержание и распределение автохтонного и аллохтонного органического вещества (ОВ) и его компонентов в больших и малых озерах Карелии. Установлено, что основное отличие исследованных водоемов связано с различным содержанием в них аллохтонного ОВ, в то время как автохтонное изменяется незначительно. В составе аллохтонного ОВ преобладают гумусовые вещества (более 90 %), а на долю связанных углеводов приходится 7 %. В автохтонном ОВ выявлены свободные углеводы (28%), липиды (3 – 4%) и белки (1,4%).

*Ключевые слова:* автохтонное и аллохтонное органическое вещество, гумусовые вещества, углеводы, липиды, белки

Природное ОВ представляет собой сложную смесь различных индивидуальных соединений, отличающихся содержанием, свойствами и происхождением. Являясь многокомпонентной системой, ОВ постоянно преобразуется в результате протекания различных внутриводоемных процессов: окисления, бактериальной деструкции, седиментации и др.

Продукционно-деструкционные процессы приводят к образованию автохтонного ОВ в самом водоеме, которое представлено биохимически лабильными компонентами – углеводами, липидами, белками. Их содержание в расчете на сухой вес может варьировать в широких пределах у разных видов фитопланктона 7 – 40 %, 2 – 44% и 2 – 40% соответственно [12,9]. Соотношение растворенных углеводов и липидов в морских и океанических водах составляет 5:1 [10,16], а в поверхностных водах по нашим данным свободных углеводов и липидов – 6:1.

Природное аллохтонное ОВ, поступающее с водосборной территории, представлено главным образом соединениями гумусовой природы (фульвовыми и гуминовыми кислотами и их солями). В различных природных объектах соотношение фульвовых и гуминовых кислот различается. В водоемах и водотоках доминируют фульвовые кислоты. Их соотношение с гуминовыми кислотами как в подземных водах, так и в слабоокрашенных поверхностных водах, составляет 10:1 [4], в высокоокрашенных – 5:1. Гуминовые кислоты преобладают в большинстве почвенных растворов и донных отложениях, и их соотношение с фульвовыми кислотами составляет 3:1 [15].

Содержание и распределение автохтонного и аллохтонного ОВ и его компонентов было рассмотрено в 2012 – 2015 гг. на разнотипных природных объектах Карелии в различные сезоны года. На Онежском озере работа велась на нескольких станциях: в Петрозаводской и Кондопожской губах, в эпилимнионе (0 – 13 м) и гиполимнионе (14 – 60) центральной части озера, а также в устье реки Шуя. В 2014 г. исследование проводилось и на Ладожском озере в период открытой воды в эпилимнионе (0 – 12 м) и гиполимнионе (13 – 90 м) в районе о. Валаам, а также на р. Неве: в истоке из Ладожского озера, в районе пос. Новосаратовка и в устье р. Невы, где

отбиралась интегральная проба из нескольких крупных рукавов дельты (Большая Нева, Малая Нева, Большая Невка, Малая Невка). Кроме больших озер сезонные наблюдения проводились и на 13 малых водоемах Карелии.

Для количественной оценки содержания автохтонного и аллохтонного ОВ использовалась методика разделения ОВ природных вод на автохтонную и аллохтонную составляющие адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе (ДЭАЭ-целлюлоза) в динамическом режиме [7]. Определение концентрации липидов и углеводов проводилось по модифицированным методикам с L-триптофановым реактивом и с фосфованилиновым соответственно [6], а белков – с красителем Кумасси R-250 [11]. Помимо определения общего содержания углеводов ( $Y_{\text{общ}}$ ) в исходной воде, осуществлялось и количественное определение их форм, которые подразделяются на свободные ( $Y_{\text{своб}}$ ), растворенные ( $Y_{\text{раств}}$ ), связанные с гумусовыми веществами ( $Y_{\text{связ}}$ ) и взвешенные углеводы ( $Y_{\text{взв}}$ ).

Доля автохтонного ОВ ( $\rho_{\text{авт}}$ ) в исследованных разнотипных озерах Карелии изменялась в пределах 12 – 81%. Общее автохтонное ОВ подразделялось на растворенное и взвешенное. Растворенное автохтонное ОВ подвержено слабой изменчивости (рис. 1), а его содержание в исследованных водных объектах изменялось в узких пределах (1,7 – 4,4 мгС/л) и в среднем составляло  $3,2 \pm 0,8$  мгС/л (по ХПК). Низкое содержание и малая изменчивость автохтонного растворенного ОВ не зависит от трофности водного объекта, а обуславливается тем, что все исследованные водоемы находятся в одной климатической зоне, где протекание продукционно-деструкционных процессов происходит на одном уровне. Среднее содержание взвешенного автохтонного ОВ в исследованных объектах составляло 5 – 35% от общего количества автохтонного ОВ. И только в эвтрофном в оз. Святозеро летом 2012 г. в период цветения воды содержание взвешенной формы автохтонного ОВ составило 6,3 мгС/л, то есть 68 % от общего количества автохтонного ОВ.

Содержание общего автохтонного ОВ в большом олиготрофном Онежском озере в течение всего периода наблюдений изменялось слабо, особенно это заметно в центральном плесе озера, где его концентрация в 2013 г. составляла 4,0 – 8,2 (в среднем 6,5 мгО/л). В Петрозаводской и Кондопожской губах содержание общего автохтонного ОВ в течение года было несколько выше, чем в центре и составляло 4,3 – 9,9 (в среднем 7,0 мгО/л) и 5,9 – 9,2 (в среднем 7,6 мгО/л) соответственно. В эпилимнионе Ладожского озера количество общего автохтонного ОВ изменялось в пределах 9,7 – 11,7 (в среднем 10,9 мгО/л) в течение периода открытой воды, а в гипolimнионе – в пределах 8,9 – 13,2 (в среднем 11,3 мгО/л). Содержание общего автохтонного ОВ в истоке р. Невы из Ладожского озера в летний период 2014 г. составляло 10,2 мгО/л, а в устье реки увеличивалось до 14,2 мгО/л.

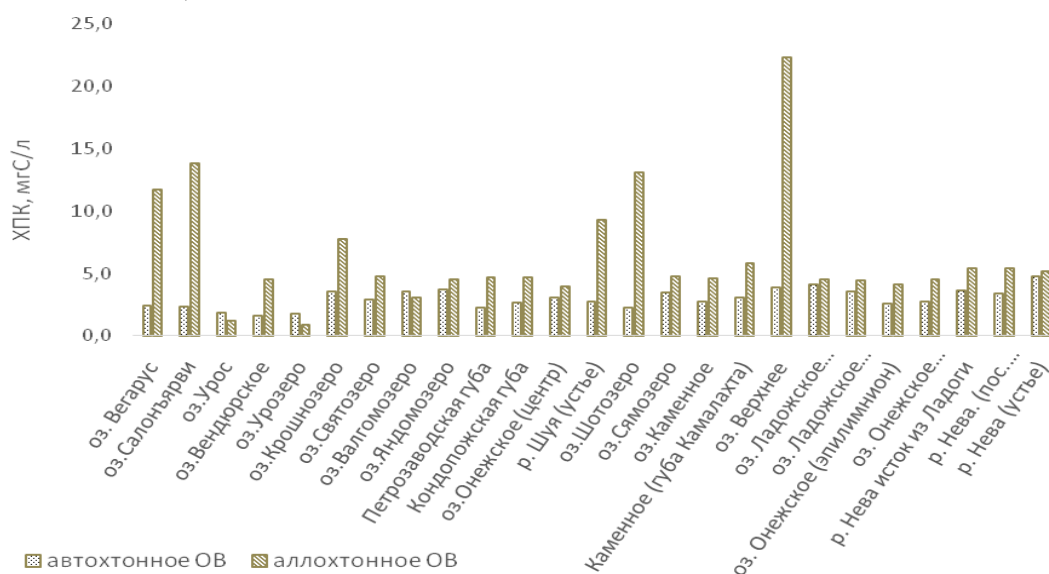


Рис. 1. Содержание растворенного автохтонного и аллохтонного ОВ в водных объектах Карелии.

В поверхностных водах наряду с ОВ, продуцируемом в самом водоеме, весомый вклад вносит природное аллохтонное ОВ поступающее с водосборной территории. В исследуемых водоемах Карелии его доля ( $\rho_{алл}$ ) составляет 19 – 88%, а содержание варьирует в широких пределах от 0,9 до 22,3 мгС/л (в среднем  $6,4 \pm 4,6$  мгС/л). Учитывая малую изменчивость автохтонного ОВ, основное отличие водоемов связано с различным содержанием в них аллохтонного ОВ, что подтверждается и данными статистической обработки (табл. 1).

Что касается содержания аллохтонного ОВ в Онежском озере, то его концентрация варьировала в пределах от 8,1 до 16,3, в среднем 11,6 мгО/л и была максимальной в Петрозаводской губе, что связано с поступлением высокогумусных вод р. Шуя (ХПК<sub>алл</sub> – 23,1 мгО/л). В Ладожском озере содержание аллохтонного ОВ составляло 10,5 – 14,4, в среднем 12,3 мгО/л, что несколько выше, чем в Онежском озере. Малые водоемы отличаются от крупных Онежского и Ладожского большей вариативностью по содержанию аллохтонного ОВ. Минимальная концентрация аллохтонного ОВ была отмечена в олигогумусном оз. Урозеро (2,5 мгО/л), а максимальная – в полигумусном оз. Верхнее (57,5 мгО/л).

Таблица 1

Статистические показатели содержания автохтонного и аллохтонного ОВ в водных объектах Карелии

Параметры	Автохтонное ОВ	Растворенное автохтонное ОВ	Аллохтонное ОВ	$\rho_{алл}$	$\rho_{авт}$
	мгО/л				
Минимальное	4,0	3,0	1,8	0,19	0,12
Максимальное	26,1	13,6	69,0	0,88	0,81
Среднее значение	9,8	8,0	17,1	0,58	0,42
Стандартное	3,7	2,3	13,3	0,17	0,17
Первый квартиль	7,4	6,7	9,8	0,49	0,32
Третий квартиль	11,7	9,7	21,5	0,68	0,51
Медиана	9,0	7,8	12,8	0,59	0,41

Примечание: число проб (n) – 84;

Соединения гумусовой природы, поступаая с водосборной территории, преимущественно из почв и торфяников заболоченных территорий, образуют основу аллохтонного ОВ природных вод. Последние исследования показывают, что содержание гумусовых веществ в составе аллохтонного ОВ достигает более 90%. Фульвовые кислоты преобладают в поверхностных водах Карелии, на их долю приходилось в среднем 76% от общего количества гумусовых веществ, в то время как гуминовых кислот было намного меньше (24 %) [2]. Таким образом соотношение фульвовых и гуминовых кислот в исследованных высокогумусных водных объектах составило 5:1, что согласуется представленными общемировыми данными.

Помимо гумусовых веществ, в составе автохтонного и аллохтонного ОВ, как уже отмечалось, были изучены такие важные компоненты, как углеводы, липиды и белки. Установлено, что углеводы в воде представлены в трех формах: свободные в составе автохтонного ОВ, связанные как компонент аллохтонного ОВ, а также углеводы во взвеси [1].

Анализ зависимости содержания различных форм углеводов от доли автохтонного ОВ показал, что количество свободных углеводов практически не меняется от его доли (рис. 2). В тоже время общее содержание углеводов, также, как и связанных, уменьшается при увеличении  $\rho_{авт}$ . Это доказывает, что в состав общих углеводов входят связанные углеводы, как компонент аллохтонного ОВ, а также свободные углеводы, как часть автохтонного ОВ. Что касается

углеводов во взвеси, то наблюдается постепенное увеличение их содержания при увеличении доли автохтонного ОВ. Из всех объектов, представленных на рис. 2, существенно выделяется оз. Святозеро, в котором летом 2012 г. в период цветения воды общая концентрация углеводов достигала 11,0 мг/л, а  $U_{\text{своб}}$  – 4,4 мг/л.

Наличие связанных углеводов обуславливается тем, что гумусовые вещества – это продукт конденсации лигнина, углеводов, белков и других веществ [3, 8]. В ходе анализа углеводов в сильноокислой среде происходит расщепление гидролизуемой части гумусовых веществ с образованием углеводов, которые наряду с аминокислотами, амидами и аminosахарами являются компонентами гумусовых веществ [5].

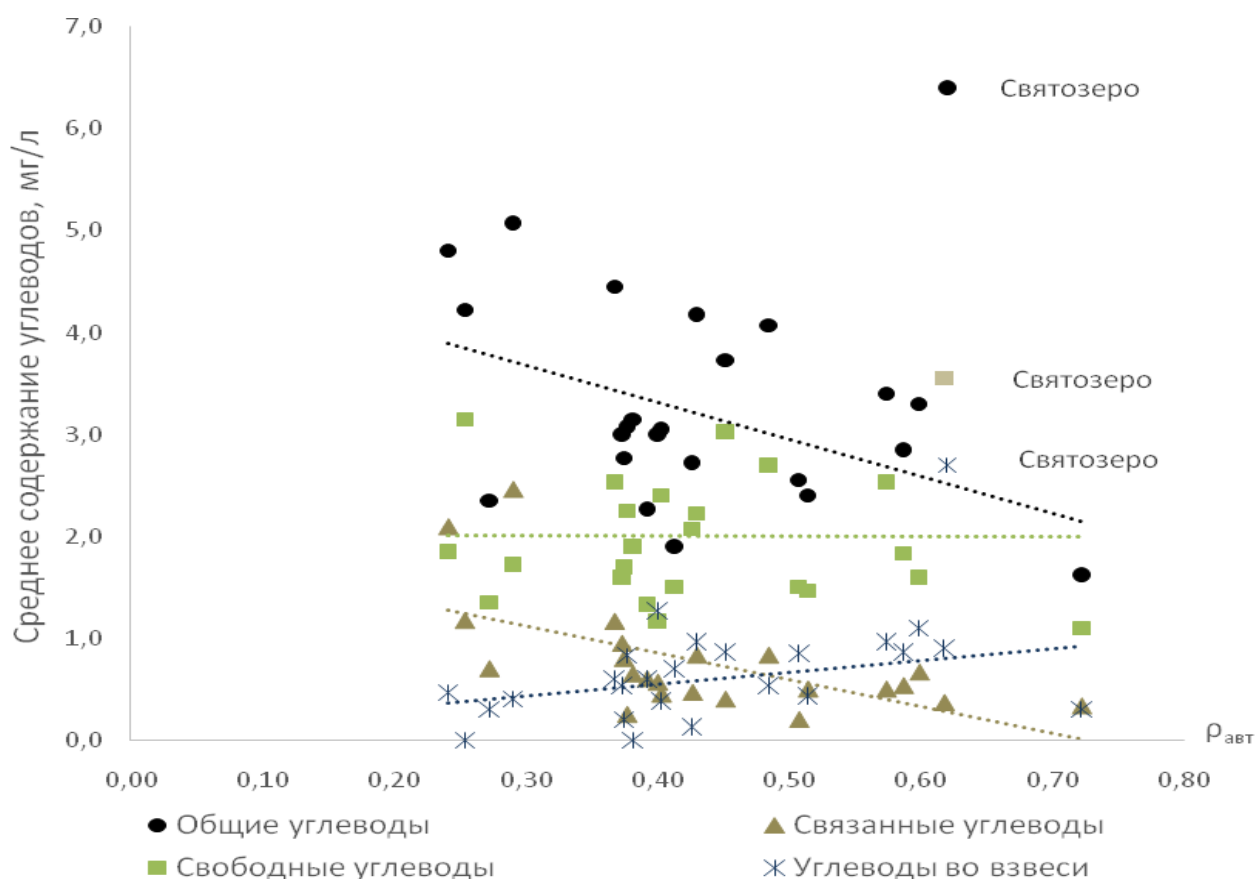


Рис. 2. Зависимость содержания различных форм углеводов от доли автохтонного ОВ.

Медианные концентрации общих углеводов в исследуемых водных объектах Карелии, включая Онежское и Ладожское озера, составили 3,3, а  $U_{\text{своб}}$  – 1,8,  $U_{\text{связ}}$  – 0,7 и  $U_{\text{взв}}$  – 0,6 мг/л. В поверхностных водах преобладают растворенные углеводы, в большей части объектов их доля составила 80 – 96%. Количество углеводов во взвеси достигало небольшой величины (7 – 17%), в среднем 14%. Тогда как количество  $U_{\text{своб}}$  в автохтонном ОВ было значительно больше – 17 – 43%, в среднем 28%. Доля  $U_{\text{связ}}$  в составе аллохтонного ОВ в озерах изменялась в пределах 4 – 17%, в среднем – 7%, при этом наибольшие значения были установлены для высокогумусных озер (27 – 51% от  $U_{\text{общ}}$ ).

Проведенные исследования показали, что углеводы, как в больших озерах Онежском и Ладожском, так и в малых водоемах Карелии являются важным биохимическим компонентом. Так в Онежском озере их содержание колеблется в пределах от 0,7 до 5,5 мг/л, составляя в среднем 16% от содержания ОВ (табл. 2). Максимальные концентрации углеводов отмечены в Петрозаводской и Кондопожской губах – в среднем 3,0 и 3,1 мг/л соответственно. Среднее содержание общих углеводов в Ладожском озере колеблется от 1,2 до 4,5 мг/л (в среднем 3,0 мг/л),



что очень близко к таковой в Онежском озере (3,1 мг/л). В малых разнотипных озерах Карелии концентрация углеводов изменялась в широких пределах от 1,2 до 11,0, в среднем 3,7 мг/л.

Таблица 2

Доля автохтонного и аллохтонного ОВ в больших и малых озерах Карелии и содержание в них углеводов, липидов и белков

Параметр	Малые озера	Онежское озеро	Ладожское
Доля автохтонного и аллохтонного ОВ			
$\rho_{авт}$	0,13 – 0,95(0,43)*	0,25 – 0,49	0,40 – 0,60
$\rho_{алл}$	0,05 – 0,87 (0,57)	0,51 – 0,75	0,40 – 0,60
Углеводы, мг/л			
общие	1,2 – 11,0 (3,7)	0,7 – 5,5 (3,1)	1,2 – 4,5 (3,0)
свободные	0,4 – 4,5 (2,2)	0,7 – 2,7 (1,8)	1,3 – 2,9 (1,7)
связанные	0,0 – 3,9 (0,9)	0,0 – 2,4 (0,7)	0,1 – 0,9 (0,5)
во взвеси	0,0 – 6,3 (0,7)	0,0 – 2,4 (0,6)	0,2 – 2,2 (0,7)
Липиды, мг/л			
общие	0,10 – 0,97 (0,31)	0,03 – 0,61	0,07 – 0,51
Белки, мг/л			
общие	0,10 – 0,92 (0,27)	(0,18)	(0,11)

Примечание: \* – среднее значение

Липиды в поверхностных водах находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ и образуются в результате протекания продукционно-деструкционных процессов. Содержание липидов в малых озерах Карелии изменялось в пределах от 0,10 до 0,97 мг/л (в среднем 0,31). Максимальная концентрация (0,97 мг/л) отмечалась при цветении воды эвтрофного оз. Святозеро в летний период 2012 г. В Ладожском и Онежском озерах количество липидов оказалось довольно близким к их содержанию в малых озерах (см. табл. 2). В центральной части Онежского озера за весь период наблюдений их концентрация изменялась в пределах 0,25 – 0,61 мг/л и составляла в среднем за год 0,35 мг/л. В оз. Ладожском наибольшее количество липидов было выявлено весной (0,40 мг/л), а в устье р. Невы – летом (0,51 мг/л). В целом количество липидов в Ладожском озере согласуется с данными для Онежского озера.

Полученные данные по количеству липидов в составе ОВ также отражают особенности функционирования фитопланктона по сезонам года. Наибольшее содержание липидов отмечалось в исследованных водоемах в весенний и летний периоды, что связано с увеличением биомассы диатомового планктона именно в эти сезоны [14,13]. Что касается распределения липидов по объектам, то наименьшая их доля отмечается в высокогумусных водоемах, а наибольшая – в олигогумусных олиготрофных озерах с высокой долей автохтонного ОВ и в составе автохтонного ОВ содержание липидов уже достигает 6,0 – 14 %.

Концентрация белков в малых водоемах Карелии изменялась в пределах 0,10 – 0,92 мг/л (в среднем 0,27). В больших стратифицированных озерах Ладожском и Онежском, а также в р. Неве содержание белков варьировало от 0,06 до 0,52 мг/л (в среднем 0,32 мг/л). Их доля от общего количества ОВ (по ХПК) в озерах составляет 1,4 %, а в составе автохтонного ОВ – 3,4%. Как и в случае с липидами, не отмечается связи содержания белков с гумусностью воды, что дает основание полагать, что белки в поверхностных водах находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ. Соотношение свободных углеводов, липидов и белков в воде составляет 6:1:1, что является таким же, как и в большинстве живых организмов.

#### Литература:

1. Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Лозовик П. А. Лабильные органические вещества (углеводы липиды и белки) в Онежском озере. // Труды Карельского научного центра РАН 2013. № 6. С. 96 – 104.
2. Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны. // Успехи современного естествознания 2015. № 12. С. 115 – 120.
3. Кононова М. М. Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 390 с.
4. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Р., Швец В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное. / С. Р. Крайнов, Б. Р. Рыженко, В. М. Швец; Отв. Ред. Академик Н. П. Лаверов. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
5. Лапин И. А., Красюков В. Н. Роль гумусовых веществ в процессах комплексообразования и миграции металлов в природных водах. // Водные ресурсы 1986, № 1, с. 134 – 145.
6. Лозовик П. А., Ефремова Т. А., Сабылина А. В. Количественное определение содержания углеводов и липидов в поверхностных водах // Вестник МГОУ. – 2013. – №3. – С.57-62.
7. Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». –2013. –№ 3. – С. 63-68.
8. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. – М.: МГУ, 1990. – 325 с.
9. Раймонт Д. Планктон и продуктивность океана. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1983. С. 214-229.
10. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М., 1977. – 255 с.
11. Руководство по современным биохимическим методам исследования водных экосистем, перспективных для промысла и марикультуры. – М.: ВНИРО, 2004. – 123 с.
12. Сиренко Л. А., Козицкая В. Н. Биологически активные вещества водорослей и качество воды. // Киев: Наук. Думка, 1988. – 256 с.
13. Тимакова Т. М., Сабылина А. В., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Водные проблемы Севера и пути их решения. Тр. Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 42 – 49.
14. Чекрыжева Т. А. Фитопланктон как компонент биоресурсной базы озера // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск, 2008. С. 24 – 36.
15. Linnik P. N., Ivanekho Ya. S., Linnik R. P., and Zhezherya V. A. Humic Substances in Surface Waters of the Ukraine. // Russian Journal of General Chemistry, 2013, Vol. 83, No. 13, pp. 2715–2730.
16. Pakulski J. D., Benner R. Abundance and distribution of carbohydrates in the ocean. // Limnol. Oceanogr. – 1994. – Vol. 39. – P. 930 – 940.

## ORGANIC MATTER AND ITS COMPONENTS IN BIG AND SMALL KARELIAN LAKES

Marija Vladimirovna Zobkova,  
Northern Water Problems Institute Karelian research center of RAS  
e-mail: rincalika21@yandex.ru  
Tat'jana Alekseevna Efremova  
Northern Water Problems Institute Karelian research center of RAS  
e-mail: efremova.nwpi@mail.ru  
Petr Aleksandrovich Lozovik,  
Northern Water Problems Institute Karelian research center of RAS  
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru  
Al'bina Vasil'evna Sabylina  
Northern Water Problems Institute Karelian research center of RAS

*Abstract:* The quantities composition of autochthonous and allochthonous organic matter (OM) in surface water of big and small Karelian lakes was presented. The main difference of investigation reservoirs was associated with different content of allochthonous OM while autochthonous OM was stable. Humic substances dominate as part of allochthonous OM (89%), while proportion of bound carbohydrates accounted for 7%. Free carbohydrates (28%), lipids (3 – 4%) and proteins (1,4%) were determined in autochthonous OM.

*Keywords:* autochthonous and allochthonous organic matter, humic substances, carbohydrates, lipids, proteins

## ИЗМЕНЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ВОДНЫХ МАСС, СОДЕРЖАЩИХСЯ В КРУПНЕЙШИХ ОЗЕРАХ МИРА, С СЕРЕДИНЫ ПРОШЛОГО ВЕКА ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Анна Владиленовна Измайлова  
к.г.н., старший научный сотрудник ИНОЗ РАН  
E-mail: [ianna64@mail.ru](mailto:ianna64@mail.ru)

*Аннотация:* Проблема пресной воды с каждым годом становится в мире все более острой, и вопросы оценки ее запасов являются важнейшей задачей при планировании практически всех видов хозяйственной деятельности. Объем вод, заключенных в крупнейшие озера, настолько велик, что их по праву можно считать важнейшим резервом пресных вод планеты. В этой связи становится важным оценить современное состояние данного ресурса и динамику его изменений в последние десятилетия.

*Ключевые слова:* крупнейшие озера, водные ресурсы, трофический статус, эвтрофирование

### Введение

Озерные воды являются важнейшей составляющей поверхностных водных ресурсов, однако их оценка в масштабах всего мира не отличается высокой точностью. Оценки объемов озерных вод Земли, выполненные разными авторами, сильно различаются даже при совместном учете пресных и соленых вод (таблица 1).

*Таблица 1*

*Оценки объемов вод, содержащихся в озерах Земли*

Источник	Суммарный объем вод в озерах Земли, км <sup>3</sup>	Объем вод пресных озер, км <sup>3</sup>	Объем вод соленых озер, км <sup>3</sup>
Nace R.L., 1969	230 000		
Львович М.И., 1974	275 000		
Tamrazyan G.P., 1974	166 000		
Wetzel R.G., 1983	229 000	125 000	104 000
Meybeck M., 1995	179 000		
Shiklomanov & Rodda 2003	176 400	91 000	85 400
Рянжин С.В., 2005	179 600		

При разделении вод на пресные и соленые оценки еще менее точны. Так, согласно оценке И.А. Шикломанова [10] объем пресных озерных вод составляет всего 91 000 км<sup>3</sup>, тогда как только в 100 наиболее крупных озерах, объемы которых определены достаточно точно, сконцентрировано около 95 000 км<sup>3</sup> воды. В тоже время R. Wetzel [13] явно завышает объемы как пресных, так и соленых озерных вод. В сравнении с оценкой R. Wetzel, большинство авторов [5,8,10] получают существенно меньшие величины по суммарному объему озерных вод Земли. К сожалению, новейшие работы, основанные на использовании спутниковой информации и новых аналитических подходов к оценке суммарного озерного покрытия планеты [6,12] и др., уточняют данные только по количеству водоемов и их суммарным площадям поверхности. При этом каждая новая работа содержит и новые уточнения по отношению к предшествующим работам. Основной фундаментальный вопрос «сколько в мире озер», пока еще не решен, вслед за ним продолжает стоять на очереди и вопрос об уточнении объемов озерных вод Земли.

Если, пытаясь хотя бы приблизительно оценить долю вод, содержащихся в крупнейших озерах мира, ориентироваться на суммарные объемы, рассчитанные Wetzel, 1983, можно заключить, что в крупнейших озерах сконцентрировано более 75% всех пресных озерных вод

Земли. Однако, если принять во внимание, что оценки R. Wetzel завышены, то доля вод, содержащихся в крупнейших озерах, еще выше. Таким образом, крупнейшие озера являются важнейшим резервом пресных вод планеты, и четкое представление об изменениях их экологического состояния крайне важно.

### **Методический подход**

Работы, связанные с оценкой изменения экологического статуса крупнейших водоемов мира проводятся в Институте озероведения РАН на протяжении последних десяти лет. Первые сведения были собраны в рамках подготовки монографии «Великие озера мира» [3], когда на основе анализа и обобщения многочисленных литературных данных, отбирались материалы по экологическому состоянию 50 наиболее крупных и экономически значимых озер. В дальнейшем, было подготовлено несколько обобщающих статей по перспективам использования вод, содержащихся в крупнейших озерах мира [4, 7], а также озер России [1], для чего был собран и проанализирован материал уже для всех озер с площадями зеркала более 1000 км<sup>2</sup>. При подготовке настоящей статьи была использована значительная часть перечисленного материала, расширенная и дополненная для возможности решения дополнительных задач, поставленных в рамках данной работы.

Список крупнейших водоемов мира, экологическое состояние которых мы анализировали, включал все крупнейшие водоемы с площадями более 1000 км<sup>2</sup>, кроме того был составлен отдельный список озер с объемами воды, превышающими 20 км<sup>3</sup>. Морфометрические параметры водоемов были взяты из приводимых в литературе списков наиболее крупных по площади и объему озер, включая материалы базы по озерам мира ILES, а также списков наиболее крупных озер по странам мира. Полученные морфометрические характеристики в дальнейшем выверялись по данным наиболее свежих научных публикаций по рассматриваемым водоемам. К сожалению, не по всем крупным озерам мира есть данные по промерам глубин и, соответственно, по ним не приводятся данные по объемам заключенной воды. В результате необходимо уточнить, что список, отобранный по площадям водного зеркала, представляется наиболее полным, в то время как список, отобранный по объемам заключенной воды, может не включать некоторые относительно крупные водоемы. Значительные объемы воды (превышающие 20 км<sup>3</sup>) могут содержаться еще в ряде северо-канадских озер, характеризующихся слабой морфометрической изученностью.

Анализ динамики изменения трофического статуса озерных вод, содержащихся в крупнейших озерах, производился на уровень до начала существенного антропогенного влияния на водоемы (естественные условия) и на уровни 1950 и 2010 гг.

При определении статуса трофности каждого водоема, прежде всего, использовались оценки, приведенные в литературе, однако периодически возникала необходимость учесть изменения трофического статуса по акватории и с глубиной. При этом учитывались данные по морфометрии водоема, батиметрические карты, анализировалось размещение основных источников загрязнения вдоль береговой линии. При наличии дополнительных данных по гидрохимии и гидробиологии водоема в ряде случаев возникала возможность детализировать оценку. Ориентируясь на данные даже единичных измерений концентрации биогенных веществ в озере и оценки первичной продукции в разные годы, были произведены ретроспективные оценки трофности и для озер, комплексное изучение которых началось лишь к третьей четверти XX века.

В связи с тем, что границы между различными категориями трофности часто оказываются размытыми, для анализа изменений трофического статуса крупнейших озер была использована шкала, включающая наряду с категориями олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные и гипертрофные воды также переходные категории - олиготрофно-мезотрофные и мезотрофно-эвтрофные.

Поскольку в основу работы были положены многочисленные литературные источники, собранная информация различается по точности, при определении трофического статуса водоемов часто использовались различные методы, учитывались разные показатели. Кроме того сильно отличается и степень лимнологической изученности крупнейших водоемов мира. Для ряда озер существуют лишь осредненные оценки их трофического статуса, основанные на

немногочисленных измерениях по ряду показателей, тогда как трофность различных частей водоема может сильно варьировать, и учета только морфометрии водоема, положенной нами в основу наших оценок разделения водных масс, в ряде случаев бывает недостаточно. Кроме того, необходимо учитывать, и тот факт, что основной объем озерных вод сконцентрирован в нескольких самых крупных озерах, тогда как на остальные приходится лишь небольшая доля от суммарной величины озерных вод. В связи с этим даже небольшие ошибки в определении трофности водных масс в самых крупных озерах больше сказываются на результирующей ошибке, чем даже значительные неточности в оценках трофности озер с меньшим объемом.

В силу вышесказанного, приводимые в данной статье суммарные оценки трофического статуса водных масс, содержащихся в крупнейших водоемах мира, не могут претендовать на высокую точность. Однако они дают убедительное представление о произошедших за полстолетия изменениях качества водных масс, содержащихся в крупнейших озерах.

### Результаты и обсуждение

К крупнейшим озерам мира принято относить водоемы с площадью водного зеркала более  $1000 \text{ км}^2$ . В настоящее время в мире насчитывается 79 пресноводных озер с площадью от  $1000$  до  $10\,000 \text{ км}^2$  и 14 с площадью превышающей  $10\,000 \text{ км}^2$ . Суммарный объем содержащихся в них вод составляет  $\sim 94\,000 \text{ км}^3$  (рисунок 1-а). На круговой диаграмме приведены все пресноводные озера с площадью зеркала, превышающей  $10\,000 \text{ км}^2$ , тогда как объем 79 озер с площадью от  $1000$  до  $10\,000 \text{ км}^2$  дан суммарно, поскольку доля каждого из них несопоставимо меньше.

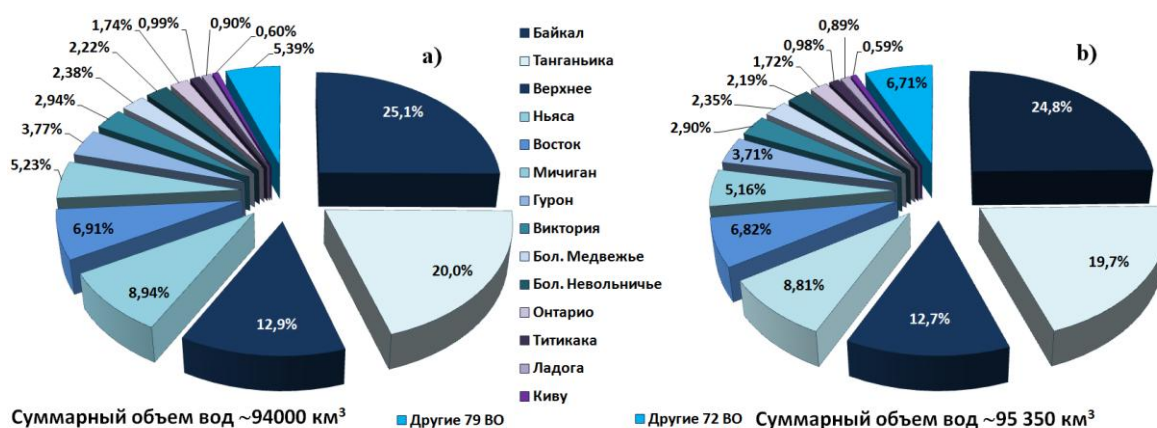


Рис. 1. Крупнейшие пресноводные озера мира: а) – озера площадью более  $1000 \text{ км}^2$ , б) – озера, содержащие более  $20 \text{ км}^3$  воды.

Если выбор озер провести по объемам заключенной в них воды, то в мире насчитывается 86 озер объемом  $>20 \text{ км}^3$ , на которые приходится  $\sim 95\,350 \text{ км}^3$  воды (рис. 1-б). На круговой диаграмме приведены все пресноводные озера с объемами воды более  $500 \text{ км}^3$ , тогда как объем оставшихся 72 озер также дан суммарно. Как уже указывалось выше, во второй список вошли лишь морфометрически изученные озера. Количество озер, содержащих более  $20 \text{ км}^3$  пресной воды, может быть несколько большим, так как для ряда крупных северных канадских озер глубины неизвестны. В этом отношении, список наибольших по площадям зеркала озер, является более полным, поскольку определение площадей больших трудностей не представляет.

На 14 самых крупных озера мира, характеризующихся площадями зеркала более  $10\,000 \text{ км}^2$  (рис. 1-а) и объемами воды более  $500 \text{ км}^3$  (рис. 1-б), приходится чуть менее 95% объема всех вод, содержащихся в крупнейших пресноводных озерах, причем только на долю 3 самых больших озера  $\sim 58\%$  этого объема. Поскольку, как видно из диаграммы, на оставшиеся озера приходится лишь немногим более 5% вод, именно 14 озер и будут в наибольшей степени определять суммарные показатели экологического статуса пресных вод, заключенных в крупнейшие озера.

Анализируя современный (полученный на уровень 2010 г.) трофический статус озерных вод (рисунок 2), было выяснено, что в озерах, наиболее крупных по площади зеркала, содержится

~83 100 км<sup>3</sup> олиготрофных вод, а в наибольших по объемам заключенной воды – ~84 500 км<sup>3</sup>. В тоже время, список крупнейших по площади озер и озер, содержащих наибольшие массы воды, существенно различаются по доли в них водоемов, находящихся на разном трофическом уровне.

Поскольку полученные результаты при анализе современного качества вод озер, находящихся в двух списках, были схожи, оценка динамики изменения экологического статуса вод, заключенных в крупнейшие озера за различные годы проводилась лишь для наиболее крупных по площади водоемов. На рисунке 3 представлена нормированная гистограмма с накоплением, показывающая изменения доли вод различной трофности в природных условиях и на уровне 1950-х и 2010-х гг. (3-а) и гистограмма изменения процента озер различной трофности (3-б).

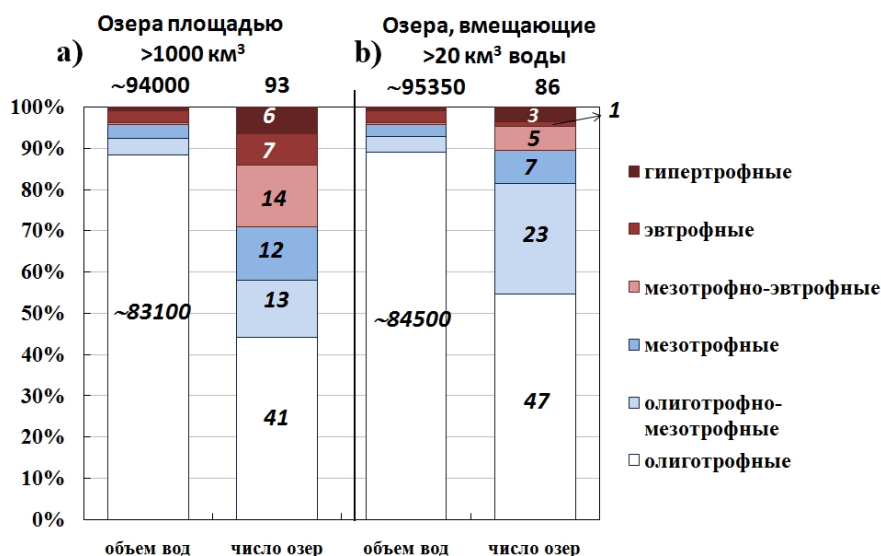


Рис. 2. Доля вод различной категории трофности в крупнейших озерах мира и процент озер различной трофности: а) – озера площадью более 1000 км<sup>2</sup>, б) – озера, содержащие более 20 км<sup>3</sup> воды.

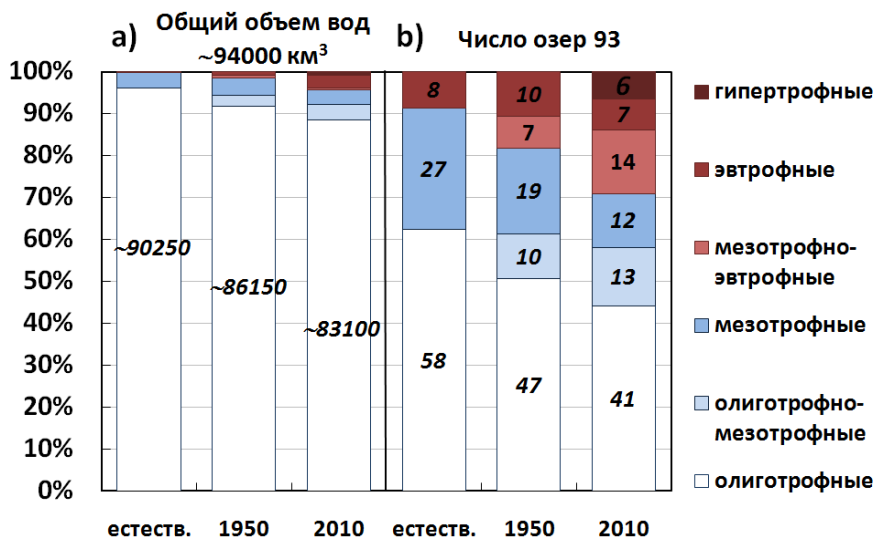


Рис. 3. Доля вод различной категории трофности в крупнейших по площади зеркала пресноводных озерах мира (а) и процент озер различной трофности (б) в природных условиях и на уровень 1950-х и 2010-х гг.

Согласно выполненному анализу в природных условиях (до начала активного антропогенного эвтрофирования) в мире насчитывалось 58 озер, превышающих по площади 1000 км<sup>2</sup>, с олиготрофными водами, 27 - с мезотрофными и 8 - с эвтрофными. Большинство олиготрофных озер характеризовались значительными глубинами, и соответственно, большими

объемами воды. На их долю приходилось около 96% от суммарного объема вод всех крупнейших озер. В тоже время мезотрофные и эвтрофные чаще всего являлись мелководными, и масса заключенной в них воды не превышала 4%.

Благодаря значительному антропогенному воздействию, затронувшему на разных этапах XX в. практически все крупнейшие озера мира, к настоящему времени лишь 41 пресноводное озеро сохраняет олиготрофный статус по всей акватории и еще 13 озер – в глубоководной зоне. Объем олиготрофных вод за период 1950-2010 гг. снизился в крупнейших пресноводных озерах на 3.5%, объем эвтрофных и гипертрофных достиг 3.2%. В природных условиях доля эвтрофных вод была крайне мала и наблюдалась лишь в нескольких крупных мелководных водоемах, характеризующихся специфическими физико-географическими условиями на водосборе.

Наиболее быстро процессы антропогенного эвтрофирования происходили в мелководных водоемах, как тропических широт, так и умеренной зоны. В тропических озерах они усиливались постоянно высокими температурами, способствующими быстрому протеканию биологических процессов. Среди крупнейших водоемов мира в результате антропогенного воздействия гипертрофный статус к началу XXI в. приобрели оз. Чапала и Манагуа, а эвтрофно-гипертрофный - оз. Тайху и часть Чудско-Псковского озера. Гипертрофного статуса достигли и более глубокие озера, находящиеся под значительным антропогенным прессом – оз. Альберт и Виктория. В 1960-70-е гг. эвтрофно-гипертрофного статуса достигало наиболее мелкое из Великих Озер – Эри. С конца 1970-х в результате принятых правительствами США и Канады мер, состояние оз. Эри начало улучшаться. В настоящее время, согласно публикуемым национальным данным, западный бассейн оз. Эри возвращается к олиготрофному состоянию, хоть его фитопланктонное сообщество пока еще по своему видовому составу отвечает характеру мезотрофного водоема. Антропогенное эвтрофирование наблюдалось также в мелководных китайских озерах Донгтингху и Поянху. Однако, поскольку оба озера расположены в бассейне крупнейшей р. Янцзы и являются в этой связи высоко проточными, они по большей части своей акватории оставались мезотрофными, несмотря на высокую степень заселенности водосбора и активное развитие здесь сельского хозяйства. Резкое повышение трофности на озерах наблюдалось в годы низкой водности. Так, значительное ухудшение качества воды отмечалось в 2000-х гг., и было связано с завершением строительства выше по течению р. Янцзы дамбы «Три ущелья» и с заполнением водохранилища полезной емкостью 22 км<sup>3</sup>, в результате чего сток по Янцзы был резко сокращен.

В больших глубоководных озерах, содержащих огромные массы воды, процессы эвтрофирования проявлялись преимущественно локально, затрагивая мелководную зону. Слабая степень антропогенного эвтрофирования наблюдалась не только на озерах, водосборы которых населены сравнительно мало (озера Канадского щита, Сибири, Патагонских Анд), но и на наиболее глубоких Великих Озерах, где начавшийся процесс ухудшения качества воды был приостановлен благодаря своевременному принятию мер.

Эвтрофирование, охватывающее прибрежную зону, наблюдалось и на глубочайших Африканских озерах - Танганьике, Ньясе и Киву, бассейны которых характеризуются высокой плотностью населения. Огромные массы воды этих озер и высокая скорость процессов самоочищения уменьшают негативные последствия антропогенного воздействия.

Благодаря тому, что именно в глубочайших озерах Земли сосредоточена основная масса воды, суммарная величина олиготрофных вод продолжает оставаться высокой. Как уже указывалось, объем олиготрофных вод в крупнейших озерах за 60 лет снизился лишь на 3.5%. При этом, благодаря улучшению состояния Американских Озер и крупнейших озер Европы, за последние десятилетия он даже увеличился по сравнению с 1960-1980-ми гг.

Обсуждая вопросы антропогенного эвтрофирования водоемов, расположенных в различных регионах мира, необходимо отметить, что наиболее жесткие последствия этот процесс имеет в тропических странах, характеризующихся: высокими температурами, способствующими быстрому развитию биоты; значительными осадками, определяющими высокие нормы вымывания биогенного вещества; высокой плотностью населения, увеличивающей степень антропогенного прессинга на природные ресурсы; отсутствием должного экологического законодательства и соответствующих институтов, что не позволяет своевременно реагировать на возникающие



проблемы; низким уровнем экономического развития, в силу которого для принятия адекватных мер не хватает средств. В экономически слабо развитых странах наиболее сложным, по всей видимости, является снижение биогенных стоков, имеющих коммунальное происхождение, при этом именно коммунальные стоки представляют наибольшую опасность, являясь источником возникновения различного рода эпидемий. Повальная бедность, примитивное жилье, высокие темпы прироста населения, отсутствие систем контроля и скоординированных действий различных организаций не позволяют охватить системами канализации даже уже построенное жилье, не говоря о постоянно возникающих новых поселениях. Из-за быстрого роста городов, существующие системы канализации не справляются с постоянно растущим объемом стоков, часто происходит их прорыв и перелив сточных вод. Даже при наличии целевого международного финансирования, направленного на строительство очистных систем, осуществить должную очистку коммунальных стоков обычно не удается. Большинство вводимых в эксплуатацию систем практически сразу не успевают справиться с очисткой постоянно увеличивающегося объема стоков, выходят из строя и не работают по несколько месяцев. Необходимо признать, что решение задачи по сокращению биогенного притока в озера в большинстве африканских и в ряде азиатских стран на ближайшее время маловероятно.

Проблемы снижения биогенной нагрузки на водоемы, расположенные в умеренной зоне решаются более успешно, особенно в странах с развитой экономикой, однако требуют колоссальных финансовых затрат. Вошедшее уже в норму с 1970-80-х гг. жесткое ограничение биогенного притока при строгом соблюдении выработанных нормативов и неуклонном соблюдении законодательства обычно приводят к неплохим результатам и улучшению экологического состояния озер. Однако даже при успешных восстановительных мероприятиях, реолиготрофикация водоема обычно идет медленно и сложно, и сопряжена с массой неожиданностей, периодическим ухудшением тех или иных показателей, характеризующих трофность. Ее скорость зависит при этом не только от масштаба принятых мер, но и от специфических особенностей самого водоема, его природной способности к самоочищению. Для мелководных и слабо проточных водоемов характерна замедленная реакция на предпринимаемые водоохранные меры, связанная с накоплением в их донных отложениях огромных объемов биогенных веществ, являющихся в дальнейшем их поставщиком обратно в воду.

В заключение необходимо отметить, что крупнейшие озера являются важнейшим резервом поверхностных пресных вод, что требует уделять особое внимание к поддержанию их экологического статуса.

#### Литература:

1. Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Оценка изменения состояния вод крупнейших озер и водохранилищ Российской Федерации/ В. Г. Драбкова, А. В. Измайлова // География и природные ресурсы. – 2014. – №4. – С. 22-29.
2. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М. – 1974. – 448 с.
3. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Великие озера мира. С-Пб. Лема. – 2012. – 372 с.
4. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Крупнейшие озёра мира и перспективы их практического использования/ В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова, А. В. Измайлова // Вестник российской академии наук. – 2014. – том 84, № 1. – С. 41–51.
5. Рянжин С. В. Много ли на Земле озер?/ С. В. Рянжин // Природа. – 2005. – №4. – С. 18-25.
6. Downing J. A., Prairie Y. T., Cole J. J., Duarte C. M., Tranvick L. J., Striegel R. G., McDowell W. H., Kortelainen P., Melack J. M. & J. J. Middleburg The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments// *Limnology and Oceanography*. – 2006. – 51. – P. 2388-2397.
7. Izmailova A. V., Romyantsev V. A. Trophic status of the largest freshwater lakes in the world// *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. – 2016. – 21. P. 21–31.

8. Meybeck M. Global distribution of lakes// Physics and Chemistry of Lakes. Berlin, Heidelberg. – 1995. – P. 1—36.
9. Nace R. L. World water inventory and control /Ed. R. J. Chorley// Water, Earth and Man. London. – 1969. – P.31—42.
10. World Water Resources at the Beginning of 21st Century/Ed. Shiklomanov I.A., Rodda J.C. Cambridge University Press. – 2003. – 450 p.
11. Tamrazyan G. P. Total lake water resources of the planet// Bull. Geolog. Soc. Finland. –1974. – V.46. №1. – P.23—27.
12. Verpoorter Ch., Kutser T., Seekell D. A., and Tranvik L. J. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery // Geophysical Research Letters. – 2014. – 41(18). – P. 6396-6402.
13. Wetzel R. G. Limnology / 2nd ed. Saunders College Publishing, Philadelphia. – 1983. – 860 p.

## **CHANGE TROPHIC STATUS OF THE WATER MASS CONTAINED IN LARGEST LAKES OF THE WORLD FROM MIDDLE OF 20-ST CENTURY TO PRESENT DAYS**

Anna V. Izmailova  
Senior Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [ianna64@mail.ru](mailto:ianna64@mail.ru)

*Abstract:* The problem of freshwater shortage is becoming increasingly acute every year and the calculating the freshwater reserves is an important task in planning almost all economic activities. The volume of water contained in largest lakes is so great that they can rightly be considered the most important reserve of surface fresh water of the planet. So it is very important to have an understanding of it's current state and the changes in the quality of this resource in recent decades.

*Key words:* largest lakes, water resources, trophic status, eutrophication

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ГРИБОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В СВЯЗИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Ирина Викторовна Иофина,  
научный сотрудник  
Лаборатории комплексных проблем лимнологии ИНОЗ РАН  
E-mail: irinaio@limno.org.ru

*Аннотация:* Водные грибы, играющие важную роль в биологических процессах, протекающих в водной среде, являются показателями трофии озера. Рост численности микопланктона вызван появлением новообразованного органического вещества за счет осенней вспышки диатомовых и последствиями этапа интенсивной перестройки озерной биоты в ходе антропогенного эвтрофирования. Антропогенное влияние вызывает перестройку видового состава микобиоты.

*Ключевые слова:* водные грибы, доминирующий комплекс, Ладожское озеро

Массовость видов водных грибов в планктоне разнотипных озер Северо–Запада России, как в естественных условиях, так и при антропогенном воздействии, довольно распространена. Водные грибы, как и бактерии, осуществляют разложение органических веществ, способствуя их минерализации и возвращению в озерные круговороты основных биогенных элементов – фосфора, азота, кремния [1]. Каждая из этих групп организмов играет важную роль в функционировании экосистемы. Массовое развитие микопланктона в Ладожском озере было связано с возникновением дефицита биологически доступного (минерального) фосфора в экосистемных круговоротах в результате интенсивного потребления его водорослями и, в еще большем количестве, бактериопланктоном в ходе антропогенного эвтрофирования озера. Водные грибы способны разлагать наиболее консервативные компоненты растворенного органического вещества речного притока – гуминовые комплексы. При этом они являются необычайно пластичной и экологически подвижной группой живых организмов с высокими адаптационными способностями и будучи гетеротрофными организмами, играют роль в круговороте веществ в озере. Своей жизнедеятельностью они способствуют минерализации органических субстратов, а уровень заспоренности воды их пропадагулами (грибные зародыши гиф и споры различных типов) является показателем трофии водоема. Особый интерес представляют облигатно водные виды, то есть не только те, которые встречаются и активно развиваются в водоемах, но главное, не могут размножаться вне водной среды [2]. Сапрофитные грибы участвуют в биодеградации всех органических субстратов, находящихся в воде. В условиях антропогенного воздействия на озеро, водные грибы могут быть использованы в качестве индикаторов степени загрязнения водоема. Их интенсивное развитие характерно для водоемов, подвергающихся техногенному воздействию. Микроскопические грибы могут прямо или косвенно влиять на активность и развитие других гидробионтов. Пути воздействия могут быть различными – от прямого паразитирования до опосредованного влияния через изменения среды обитания, путем выделения биологически активных метаболитов [3].

Задачей исследования, помимо выявления видового состава, распространения микофлоры Ладожского озера был анализ индикаторных возможностей микобиоты.

Для выделения водных грибов был использован метод глубинного посева воды. Учет грибов производился в пробах, отобранных с водной поверхности, в отдельные годы – по горизонтам. Использовалась агаризованная питательная среда - сусло-агар. С целью задержки роста бактерий к среде добавляли смесь антибиотиков. Опыты проводились в чашках Петри. Засеянные чашки Петри инкубировались в течение недели при температуре 18-24°C, выросшие колонии подсчитывали, а представителей отличающихся колоний отсеивали в пробирки со скошенным агаром того же состава [4,5]. Видовое определение культур осуществлялось согласно требованиям

определителей Lodder [6] и Пидопличко [7]. Определялась общая численность микопланктона, как показателя трофического уровня водоемов.

За многолетние исследования микобиоты озера было определено более 40 видов. Видовой состав водных грибов представлен 5 классами: *Hyphochytridiomycetes*, *Chytridiosomycetes*; *Oomycetes*, *Zygomycetes*, *Deuteromycetes* (Рис.1). Доминируют виды таксономических групп оомицетов, зигомицетов и несовершенных грибов. Из класса *Oomycetes* наиболее распространенными являются *Saprolegnia ferax* (Gruith) и *Lactomytus lacteus* Ag. Из класса *Zygomycetes* периодически отмечалась высокая встречаемость грибов из рода *Mucor*; представители остальных родов встречались редко. Класс *Deuteromycetes* широко представлен родами *Penicillium*, *Trichoderma*, *Candida* и *Rhodotorula*. Доминирующий комплекс в разные годы наблюдений и сезоны менялся. В последние годы отмечается изменение качественного состава микопланктона в сторону увеличения численности дрожжевых грибов, которые образуют, в последние годы, доминирующий комплекс, вытеснив виды других таксономических групп. При антропогенном воздействии отмечается повышение популяции дрожжевых клеток [8].

Анализ частоты встречаемости микопланктона показал, что можно условно разделить на 3 группы: постоянные, периодические и редкие виды [9]. Группа постоянных обитателей представлена видами грибов, чье развитие было стабильным на протяжении многолетних наблюдений, колебалась лишь численность того или иного вида (родов *Mucor*, *Trichoderma*, *Penicillium*). Вторая группа – виды встречающиеся периодически по всей акватории или в отдельных районах озера. К этой группе относятся виды родов *Achlya*, *Chytridium*, *Aspergillus*.

Третья группа, виды, встречающиеся эпизодически и имеющих очень низкую численность. Это виды рода *Fusidium*, *Rhizophidium*, *Woronina* и др. Эти виды не могут оказывать существенного влияния на различные процессы, происходящие в озере. Таким образом, можно отметить, что первые две группы составляют стабильный комплекс мицелиальных грибов, участвующий в деструкционных процессах.

Анализ вертикального распределения видового состава в водной толще показал, что большинство видов не имеют четкой приуроченности к какому-либо горизонту. Многолетний количественный анализ микофлоры показывает, что высокие значения микопланктона были характерны для 80-х годов (максимум отмечался в 1986 году и составлял 7500 п/л), что объяснялось последствиями процесса антропогенного эвтрофирования.

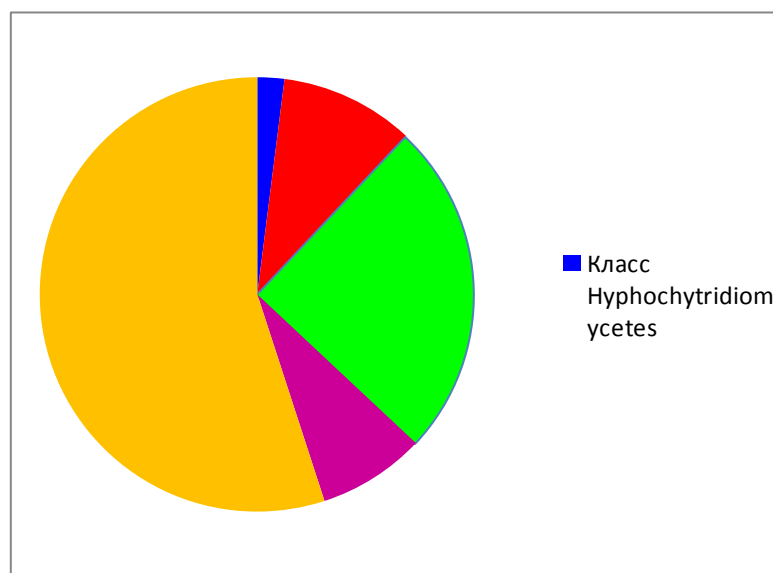


Рис. 1. Встречаемость таксономических групп водных грибов в Ладожском озере (%).

Снижение численности стало наблюдаться с 1991 года, когда антропогенная нагрузка на озеро упала (Рис.2). С 2001 года средняя численность микопланктона по акватории озера колебалась от 500 до 900 пропагул/л. В период исследования 2009-2015 годов максимальная

численность водных грибов отмечалась в 2013 году и составляла 7000 п/литр, что вероятно было вызвано осенней вспышкой диатомовых и последствиями этапа интенсивной перестройки озерной биоты в ходе антропогенного эвтрофирования.

Исследования 2015 года показали самые низкие значения микопланктона с 2009 года, при этом произошла видовая перестройка доминирующего комплекса, возможно вызванная ростом объема новообразованного органического вещества. Для всех районов озера были характерны относительно низкие значения численности и колебания от 200 до 2200 пропагул/литре.

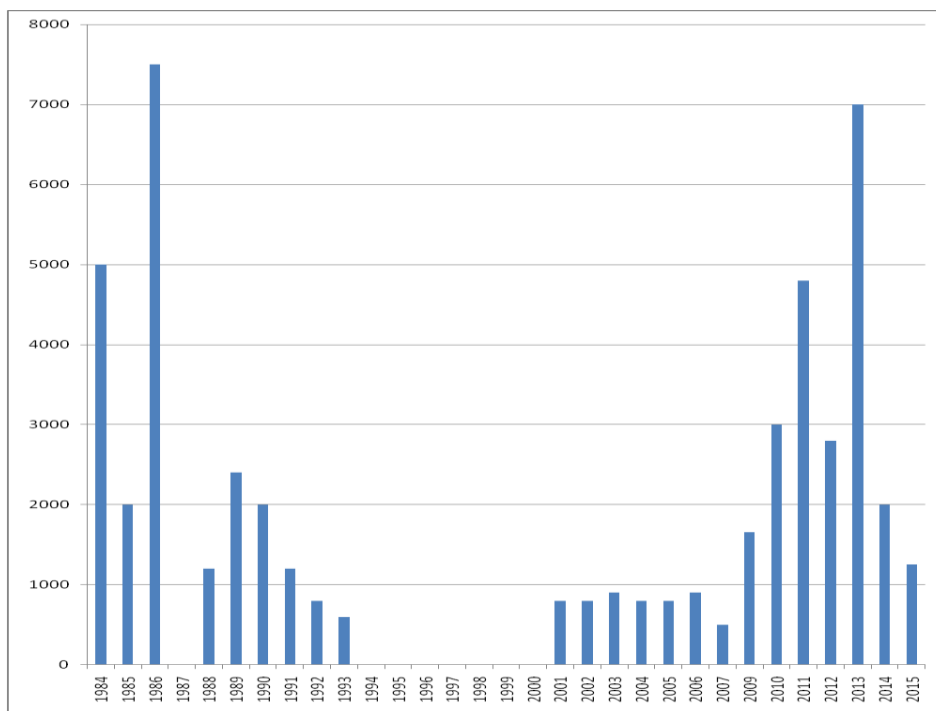


Рис. 2. Численность водных грибов по акватории Ладожского озера (пропагул/литр).

Причем, как максимальные, так и минимальные значения отмечались в районе Волховской губы. (Рис.3) Влияние вод р. Волхов, которое характеризовалось обилием почвенного микопланктона, наблюдалось только на 1 станции (2200 п/л). На других станциях этой губы зарегистрированы минимальные значения. Видовой состав был представлен типичными озерными видами. Такое распределение согласуется с полученными гидрохимическими данными. Известно, что при ветрах северного направления Волховская губа заполняется озерными водами, чем и можно объяснить наблюдаемую картину.

На всем протяжении наблюдений распределение водной микофлоры по акватории озера было неравномерным (Рис.3). Наиболее богат в видовом и численном отношении прибрежный район. Именно здесь были выделены виды, развитие которых связано с повышенным содержанием органического вещества и антропогенного загрязнения – *Saprolegnia ferax*, *Leptomyces lacteus*. [10,11] Причем на грибах рода *Saprolegnia* был обнаружен паразитирующий *Woronina polycystis Cornu*. В Волховской губе, в отдельные годы, выделялись дрожжевые грибы *Rhodotorula rubra* и *Torulopsis candida*, что указывает на локальные техногенное воздействие [12].

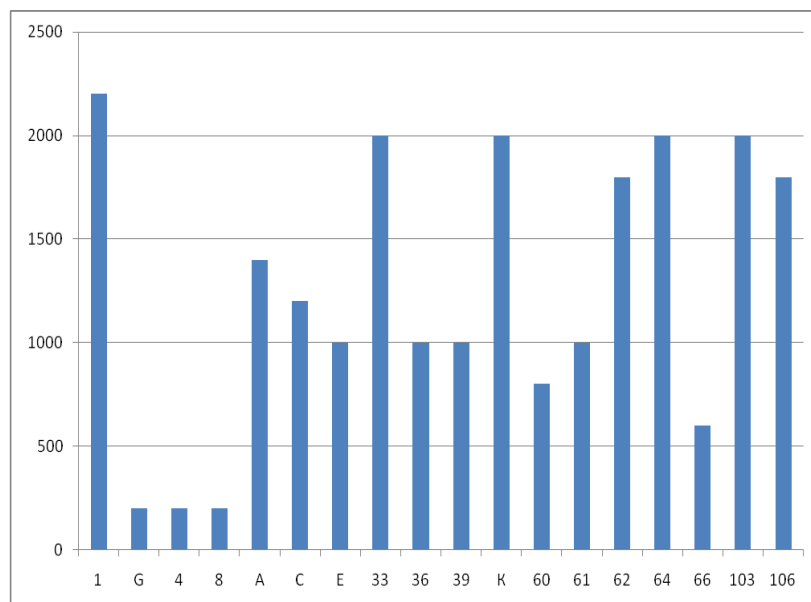


Рис. 3 - Численность водных грибов по акватории Ладожского озера в августе 2015г. (пропагул/литр).

В профундальном районе отмечались единичные экземпляры *Rhizophidium planctonicum* паразитирующие на водоросли *Asterionella formosa*. В ультрапрофундальном районе единожды был обнаружен *Olpidiopsis sp.* паразитирующий на водорослях рода *Zygnema* (рис.4).

Полученные данные не показали наличия грибов в таких объемах, которые могли бы привести к ухудшению качества воды.

Можно предположить, что отмечающийся рост численности был вызван появлением новообразованного органического вещества за счет осенней вспышки диатомовых и последствиями этапа интенсивной перестройки озерной биоты в ходе антропогенного эвтрофирования. Следует отметить, что в случае роста объема новообразованного органического вещества (НОВ) в придонных слоях прибрежных районов можно ожидать появления дрожжевых грибов с высокой численностью, на порядок и более превышающей нынешнюю, с образованием массовых колоний, что может привести к ухудшению качества воды.

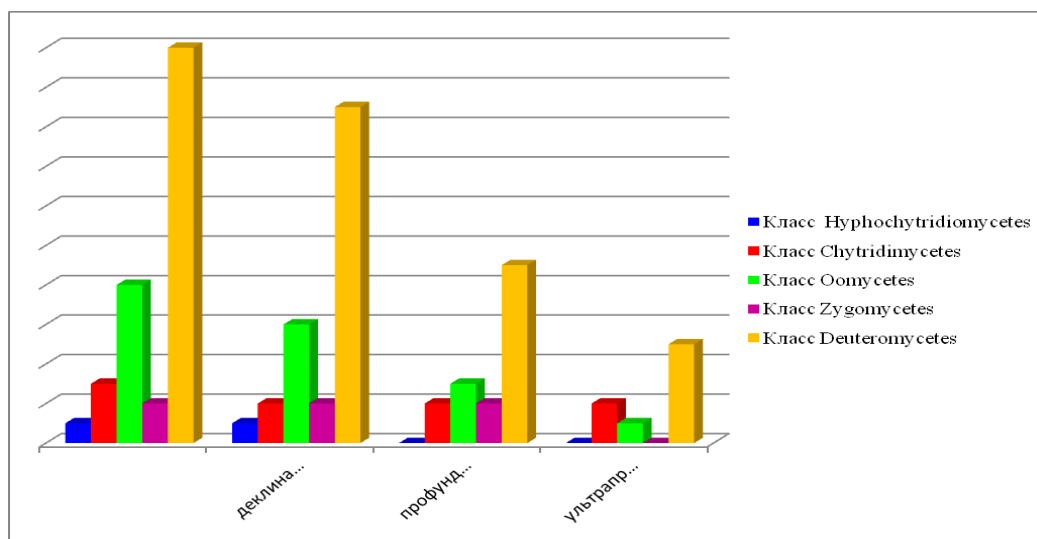


Рис. 4. Распределение микопланктона по районам Ладожского озера. (пропагул/литр).

Многолетние ряды комплексных наблюдений на Ладожском озере позволили оценить роль водных грибов в озерной экосистеме в процессе ее эволюции под антропогенным воздействием.

#### Литература:

1. Дудка И. А. Грибы как компоненты пресноводных биоценозов // Ми-кол. и. фитопатол. 1974. Т.8. № 5. С.444—449.
2. Терехова В. А. Микобиота в мониторинге водных экосистем. Микол. и фитопатол. 1995. Т.29. Вып.1. С.36—40.
3. Александрова Л. П., Жданова Н. Я. Исследование физиологии и экологии водных грибов и использование их при биохимической очистке // Теория и практика биологии самоочищения загрязненных вод. М. Наука. 1972. С.151-154.
4. Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989.
5. Литвинов М. А., Дудка И. А. Методы исследования микроскопических грибов пресных и соленых (морских) водоемов. Л. Наука. 151 с.
6. Lodder J. The yeast. A taxonomic study. Amsterdam-London. 1970. 658 p.
7. Пидопличко Н. М., Милько А. А. Атлас мукоральных грибов. Киев. Наукова думка. 1975. 187 с.
8. Солнцева Н. П. Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели)//Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 23-41.
9. Семенова Т. А. Антропогенная изменчивость микроскопических грибов в водных экосистемах (на примере водоемов Среднего Поволжья). Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. 36 с.
10. Коколия Т. Г. О развитии водного гриба Лептомитуса и других компонентов биологических обрастаний в р. Неве //Санитарное состояние реки Невы. Л. 1967. С. 110-126.
11. Терехова В. А., Швед Л. Г. Численность и биомасса микроскопических грибов в малых реках Среднего Поволжья // Биолг. Науки. 1991. № 6. С. 74-82.
12. Терехова В. А. Микромитеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М.;Наука, 2007. - 215 с.

### **THE WATER FUNGI OF LADOGA LAKE EVALUATION STATE AT THE IMPACT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS**

Irina V. Iofina  
s.r. Laboratory of Limnological problems  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [irinaio@yandex.ru](mailto:irinaio@yandex.ru)

*Abstract:* Aquatic fungi, which play an important role in biological processes of the aquatic environment, are indicators of the lake trophic status. The mikoplankton's growth is caused by the production of the newly formed organic substance due to the autumnal blooming of diatoms and the effects of the intensive lake biota rearrangement. The restruction of the microbiota composition is caused by anthropogenic influence.

*Keywords:* aquatic the dominant complex, Ladoga lake

## ВОДНЫЕ СООБЩЕСТВА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Наталья Михайловна Калинин,  
д.б.н., заведующий лабораторией гидробиологии  
ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
e-mail: [cerioda@mail.ru](mailto:cerioda@mail.ru)

Елена Валентиновна Теканова,  
к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
e-mail: [etekanova@mail.ru](mailto:etekanova@mail.ru)

Мария Тагевна Сярки,  
к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
e-mail: [msyarki@mail.ru](mailto:msyarki@mail.ru)

*Аннотация:* Рассмотрены основные экологические проблемы Онежского озера, связанные с действием антропогенного фактора, биологическим загрязнением и климатическими изменениями. Показано, что в последнее десятилетие антропогенная нагрузка на водоем от точечных источников уменьшилась, что сказалось на состоянии глубоководного бентоса, численность и биомасса которого в разных районах озера резко снизились. В последние годы на Онежское озеро стали воздействовать рассеянные источники загрязнения (форелевые хозяйства), которые вызывают эффекты локального эвтрофирования водоема. К новым факторам влияния на экосистему Онежского озера относится вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus*. Появление на литорали озера нового вида привело к улучшению кормовой базы рыб. В то же время неизученной остается роль вселенца в распространении паразитов рыб. Температурный режим Онежского озера находится под воздействием климатических изменений, что отражается на жизненных циклах планктонных ракообразных.

*Ключевые слова:* Онежское озеро, биота, антропогенное воздействие, биоинвазии, климатические изменения

Онежское озеро – уникальная северная природная экосистема с вековыми запасами чистой маломинерализованной воды. Это второй по величине пресноводный водоем Европы, его площадь составляет 9720 км<sup>2</sup>, средняя глубина 30 м, максимальная – 120 м, объем воды 295 км<sup>3</sup>. На большей части своей акватории Онежское озеро пока сохраняет свой природный экологический статус.

Главные угрозы естественному состоянию экосистемы Онежского озера связаны с действием антропогенного фактора, биологическим загрязнением и климатическими изменениями [3].

Наиболее загрязненными и эвтрофированными районами озера являются Кондопожская и Петрозаводская губы, на побережье которых расположены крупные города и производства Карелии. Несмотря на относительную изолированность этих заливов от основной акватории озера, периодически, в зависимости от гидрометеорологической ситуации, наблюдаются выносы загрязненных вод в сопредельные участки озера, что отражается на состоянии планктона.

Антропогенная нагрузка на водоем от коммунально-промышленных центров, расположенных на побережье Петрозаводской и Кондопожской губ, после 1990-х годов стала падать в связи экономической ситуацией в стране (рис. 1).



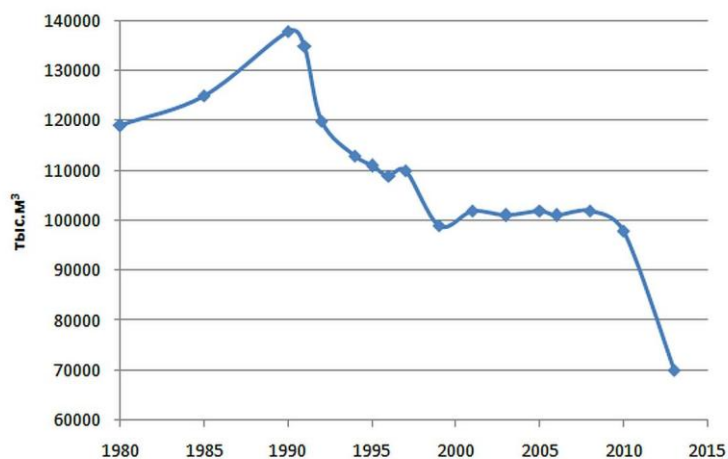


Рис. 1. Динамика сброса сточных вод в прибрежной зоне Онежского озера (цит. по [4]).

Спустя 10 лет на эти изменения отреагировали бентосные сообщества Петрозаводской губы (рис. 2А), количественные показатели которых в настоящее время приближаются к уровню 1960-х годов [2]. Кроме того, существенное падение численности бентоса в центральной части озера указывает на то, что загрязнением из заливов были затронуты донные отложения этого района (рис. 2Б).

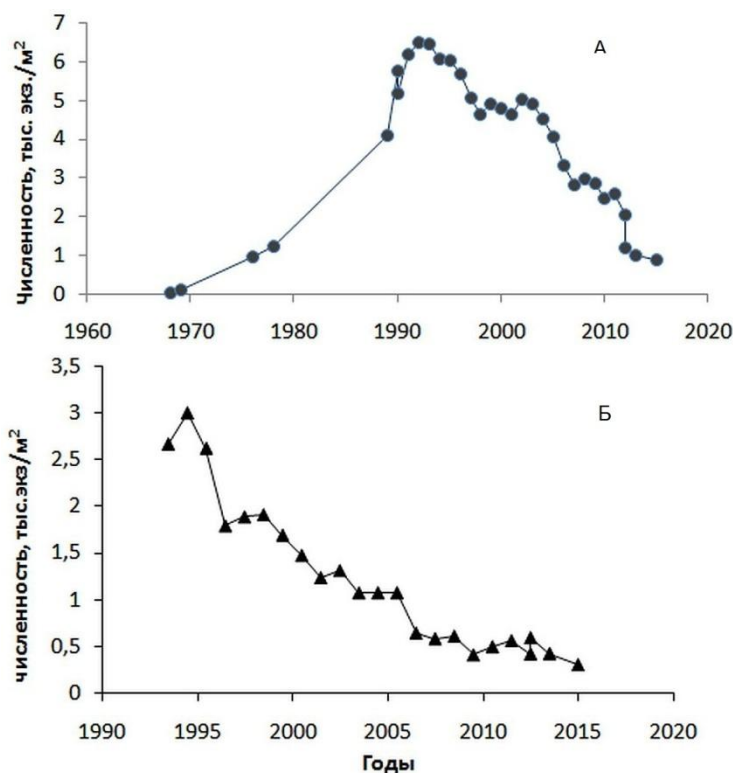


Рис. 2. Изменение численности макрозообентоса в Петрозаводской губе (А) и в центральной части (Б) Онежского озера.

В настоящее время наряду со снижением нагрузки от точечных источников загрязнения все большую значимость приобретают рассеянные источники, такие как бурно развивающиеся в северо-западной части озера форелевые хозяйства [8]. Скуденность рыб в садках, продукты их жизнедеятельности, остатки кормов могут отрицательно сказываться на качестве воды, например,

вызывать снижение растворенного кислорода, зарастание прибрежные участков, цветение воды, снижение ее качества и другие последствия, что требует постоянного биомониторинга.

Еще одной новой угрозой экосистеме Онежского озера можно назвать обнаруженное несколько лет назад и продолжающееся до сих пор загрязнение озерной воды нефтепродуктами (а также, возможно, другими токсическими веществами) в прибрежье г. Петрозаводска, куда они поступают по ливневой канализации. Недавно эта проблема обсуждалась в Законодательном Собрании Республики Карелия [9].

Биологическое загрязнение Онежского озера было обнаружено в 2001 г., когда в северо-западном прибрежье был идентифицирован новый вид бентоса *Gmelinoides fasciatus* Stebbing [1]. В настоящее время, спустя 15 лет, этот рачок расселился по всей береговой линии озера (рис. 3), достиг большой численности и стал основным кормовым объектом молоди рыб [7]. Его появление может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на рыбное население озера. Во-первых, возможно увеличение рыбопродуктивности за счет улучшения кормовой базы. Во-вторых, являясь промежуточным хозяином паразитов рыб, *G. fasciatus* может увеличить степень их зараженности.

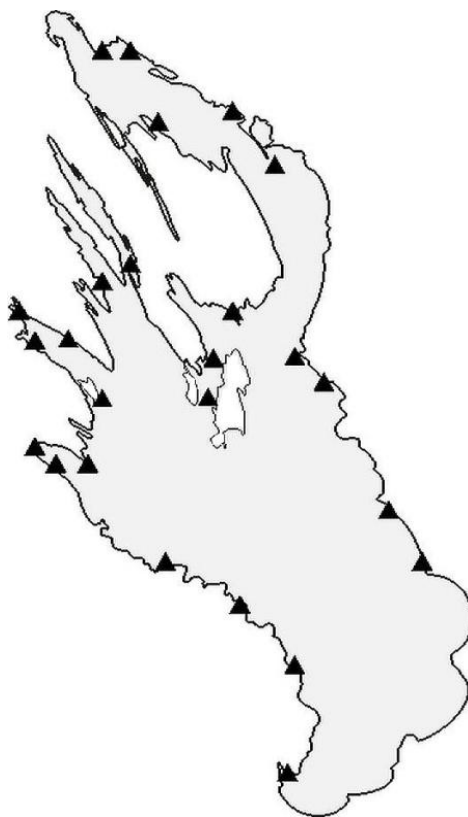


Рис. 3. Места нахождения байкальского вселенца (амфиноды *Gmelinoides fasciatus*) на литорали Онежского озера.

Кроме антропогенного фактора определенное влияние на экосистему Онежского озера могут оказывать климатические изменения [5;6]. В целом по Карелии они проявляются в повышении годового количества атмосферных осадков на 20-70 мм и среднегодовой температуры воздуха на 1°C по сравнению с 1960-ми годами. Повышение температуры воздуха сказывается на увеличении теплозапаса водоема. В свою очередь, количество накопленного в водоеме тепла (сумма эффективных температур выше 10°C) имеет огромное значение для биоты, поскольку определяет протекание основных фаз жизненных циклов. Кроме того, нарушения жизненных циклов могут быть вызваны также и колебаниями температурного режима озера как это показано для планктонных ракообразных (рис. 4). Так, в экстремально жаркие 1989 и 2010 годы развитие планктонных рачков в Онежском озере началось на 15-20 суток раньше обычного, а в холодном 1966 г. наблюдалась 10-дневная задержка в их развитии.

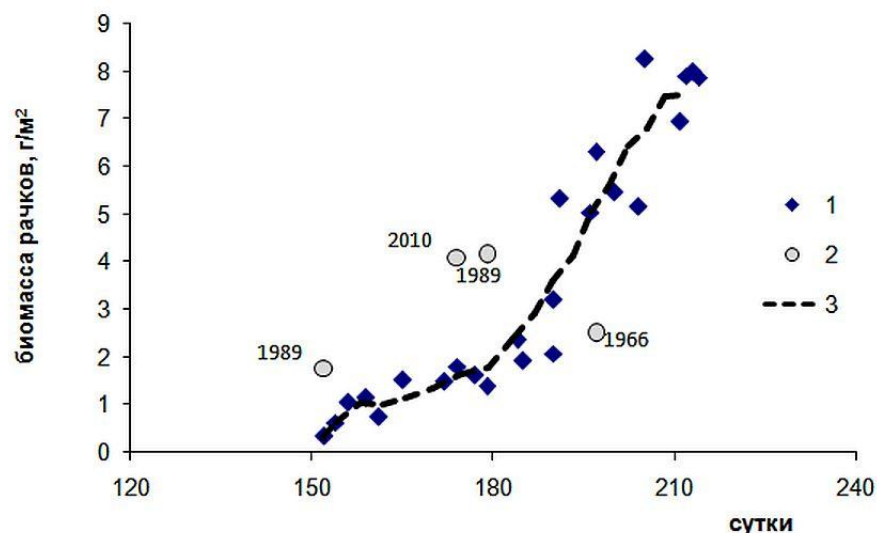


Рис. 4. Реакция планктонных ракообразных на экстремальные сдвиги температуры воды; 1 – эмпирические данные; 2 – экстремально отклонившиеся данные; 3 – скользящая средняя.

Таким образом, экосистема Онежского озера постоянно находится в условиях мультифакторного внешнего воздействия. Для сохранения экосистемы такого уникального водоема как Онежское озеро необходимо разработать научные основы биомониторинга с учетом его биогеохимических особенностей, что в дальнейшем может стать основой для обсуждения Закона об охране Онежского озера.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766)».

#### Литература:

1. Березина Н. А. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро / Н. А. Березина, В. Е. Панов // Зоологический журнал. – 2003. – Т. 82, № 6. – С. 731–734.
2. Калинин Н. М. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия / Н. М. Калинин, А. И. Сидорова, Т. Н. Полякова, Н. А. Белкина, Н. А. Березина, И. А. Литвинова // Принципы экологии. – 2016. – Т. 5. № 2. – С. 47–68. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5182.
3. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калинин, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – 375 с.
4. Литвинова И. А. Анализ водохозяйственного использования водосбора на основе ГИС-технологий / И. А. Литвинова, А. В. Литвиненко, М. С. Богданова // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях: ред. Н. Н. Филатов, Н. М. Калинин, Т. П. Куликова, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовик. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 52–60.
5. Назарова Л. Е. Атмосферные осадки в Карелии / Л. Е. Назарова // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Лимнология. – 2015. – №9. – С.114–121.
6. Назарова Л. Е., Изменчивость климата по данным метеорологических наблюдений / Л. Е. Назарова, Н. Н. Филатов // Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. – С. 12–34.

7. Сидорова А. И. Инвазия байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро. Сезонная динамика популяционных показателей / А.И. Сидорова, Н.М. Калинкина. – LAP Lambert Academic publishing. 2015. – 80 с.

8. Стерлигова О. П. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели / О. П. Стерлигова, С. П. Китаев, Н. В. Ильмаст, С. Ф. Комулайнен, Я. А. Кучко, С. А. Павловский, Е. С. Савосин // Поволжский экологический журнал. – 2011. – № 3. – С. 386–393.

9. Туоми А. Экологическая катастрофа, которой никто не заметил? / А. Туоми // Вести Карелии. Деловая интернет-газета. – 2016. <http://vesti.karelia.ru/social/>

## **AQUATIC COMMUNITIES OF ONEGO LAKE UNDER ANTHROPOGENIC INFLUENCE, BIOLOGICAL INVASION AND CLIMATE CHANGING**

Nataliia Michailovna Kalinkina

Dr.Sc., head of laboratory of hydrobiology

Northern Water Problems Institute Karelian Research Center Russian Academy of Sciences

e-mail: [cerioda@mail.ru](mailto:cerioda@mail.ru)

Elena Valentinovna Tekanova

PhD., senior scientist of laboratory of hydrobiology

Northern Water Problems Institute Karelian Research Center Russian Academy of Sciences

e-mail: [etekanova@mail.ru](mailto:etekanova@mail.ru)

Maria Tagevna Syarki

PhD., senior scientist of laboratory of hydrobiology

Northern Water Problems Institute Karelian Research Center Russian Academy of Sciences

e-mail: [msyarki@mail.ru](mailto:msyarki@mail.ru)

*Abstract:* The main environmental problems of Onego Lake connected with anthropogenic factors, biological invasions and climate changing were presented. It was shown that in the last decade, the anthropogenic load on the water ecosystem from point sources had decreased, affecting the state of the deepwater benthos, abundance and biomass of which in different parts of the lake had reduced. In recent years diffuse sources of pollution (trout farms) began to affect Onego Lake. It caused local eutrophication effects. The invasion of Baikalian amphipods *Gmelinoides fasciatus* belonged to new factors of influence on Onego Lake. The appearance of this species in littoral zone led to the improvement of food base of fish. At the same time its role in the spread of fish parasites remained unexplored. Temperature regime of Onego Lake is under the influence of climate changing which is reflected in the life cycles of plankton crustaceans.

*Keywords:* Onego Lake, biota, anthropogenic influence, biological invasion, climate changing

## БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО С ЧАСТНОГО ВОДОСБОРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Сергей Алексеевич Кондратьев,  
д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе  
ИНОЗ РАН  
e-mail: kondratyev@limno.org.ru  
Юрий Александрович Брюханов,  
к.т.н., заведующий лабораторией  
Институт агроинженерных и экологических проблем  
сельскохозяйственного производства  
e-mail: sznii@yandex.ru  
Наталья Владимировна Викторова  
к.т.н., доцент  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
e-mail: nata\_vic@mail.ru  
Марина Валентиновна Шмакова  
к.т.н., научный сотрудник  
ИНОЗ РАН  
e-mail: m-shmakova@yandex.ru  
Наталья Сергеевна Обломкова,  
ведущий инженер  
Санкт-Петербургская ОО «Экология и бизнес»  
e-mail: ivaskova.natali@yandex.ru  
Елена Геннадьевна Маркова,  
научный сотрудник  
ИНОЗ РАН  
e-mail: adelmonamour@mail.ru

*Аннотация:* С использованием методов математического моделирования дана количественная оценка нагрузки общим азотом и общим фосфором на Ладожское озеро со стороны частного водосбора в современных условиях. Рассчитанные значения нагрузки для года средней водности составили 17334.0 т N/год и 1055.3 т P/год, при этом на долю фоновой (природной) компоненты нагрузки приходится 87% по азоту и 72% по фосфору от значений суммарной нагрузки на озеро. Современная фосфорная нагрузка на озеро с частного водосбора не превышает 13 % от значения критической нагрузки, обеспечивающей переход Ладоги озера в эвтрофное состояние.

*Ключевые слова:* биогенная нагрузка, математическое моделирование, точечные и диффузные источники

Биогенная нагрузка на Ладожское озеро со стороны водосбора может быть оценена следующими двумя способами:

1. Расчет поступления биогенных веществ с притоками озера по данным мониторинга, что и было сделано в 1996 году [6]. При этом использовались материалы, полученные в результате измерений расходов воды и концентраций биогенных веществ в речном стоке в рамках государственного мониторинга водных объектов, существовавшего в советский период, а также данные собственных наблюдений Института озероведения.
2. Расчет внешней биогенной нагрузки с использованием методов математического моделирования. Это направление исследований было развито в начале 2000-х годов. В результате разработана модель фосфорного баланса Ладожского озера и его водосбора [4].

Естественно, что по мере развала системы государственного мониторинга водных объектов и установления баснословной стоимости имеющихся скудных данных измерений, востребованность методов математического моделирования при решении задачи оценки нагрузки на озеро существенно возрастает. Однако и здесь возникают существенные сложности со сбором и интерпретацией информации об источниках нагрузки (минеральные и органические удобрения, животноводство и птицеводство, вынос биогенных веществ с выращенным урожаем и др.). Сказанное является причиной поиска контактов со специалистами в области изучения сельскохозяйственного производства северо-западного региона РФ.

Целью настоящего исследования является количественная оценка нагрузки общим азотом ( $N_{\text{общ}}$ ) и общим фосфором ( $P_{\text{общ}}$ ) на Ладожское озеро с частного водосбора с использованием методов математического моделирования формирования биогенной нагрузки, разработанных в Институте озераедения РАН (ИНОЗ РАН) и Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП).

Основой расчетного метода являются модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты ILLM – *Institute of Limnology Load Model* (свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015), разработанная в ИНОЗ РАН и модифицированная в соответствии с требованиями решаемой задачи [7], а также модель биогенной нагрузки, сформированной сельхозпредприятиями, предложенная специалистами ИАЭП [3].

Нагрузка  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$  на водоем-водоприемник ( $L$ ) со стороны водосбора рассчитывается как сумма биогенной нагрузки на гидрографическую сеть водосбора, сформированной сельхозпредприятиями ( $L_{agr}$ ), диффузной нагрузки, сформированной естественными и антропогенными (измененными) ландшафтами, не подверженными в настоящее время сельскохозяйственному воздействию ( $L_c$ ), а также атмосферных выпадений ( $L_a$ ). Кроме того, в формировании нагрузки принимают участие точечные источники загрязнения, сбрасывающие свои сточные воды в гидрографическую сеть ( $L_{p1}$ ) и непосредственно в водоем-водоприемник ( $L_{p2}$ ):

$$L = (L_{agr} + L_c + L_a + L_{p2})(1 - R) + L_{p1}, \quad (1)$$

где  $R$  – коэффициент удержания водосбором и его гидрографической сетью, безразмерная величина. Остальные члены уравнения (1) имеют размерность т/год.

Нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий, рассчитывается следующим образом:

$$L_{agr} = \sum_{i=1}^{n_1} A_i (M_{soil i} K_1 + (\alpha_1 M_{min i} + \alpha_2 M_{org i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000, \quad (2)$$

где  $M_{soil i}$ ,  $M_{min i}$  и  $M_{org i}$  – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля  $i$ -го сельхозпредприятия (кг/га);  $A_i$  – площадь угодий  $i$ -го сельхозпредприятия, га;  $n_1$  – количество сельхозпредприятий;  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами;  $\alpha_2$  – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв;  $K_2$  – коэффициент удалённости контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети;  $K_3$  – коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению);  $K_4$  – коэффициент, характеризующий механический состав почв;  $K_5$  – коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т.е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ;  $K_6$  – коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических и минеральных удобрений. Все коэффициенты безразмерные. Значения указанных коэффициентов, рекомендованные для использования при расчетах биогенной нагрузки с сельхозугодий северо-запада России, приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Значения коэффициентов уравнения (2)*

Коэффициент	<i>N</i>	<i>P</i>
$\alpha_1$	0.3	0.03
$\alpha_2$	0.1	0.02
$K_1$	0.03	0.008
$K_2$ (от 50 до 500м)	0.6	0.6
$K_2$ (от 500 до 2000м)	0.2	0.2
$K_2$ (более 2000м)	0.1	0.1
$K_3$ (дерново-подзолистые почвы)	1.0	1.0
$K_3$ (карбонатные почвы)	1.2	1.4
$K_3$ (торфянистые почвы)	0.8	1.0
$K_4$ (тяжелые глинистые и суглинистые почвы)	1.0	1.0
$K_4$ (легкие супесчаные и песчаные почвы)	1.8	2.0
$K_5$ (крупный рогатый скот)	0.46	0.37
$K_5$ (растениеводство)	0.88	0.76
$K_5$ (птицеводство)	0.46	0.37
$K_5$ (свиноводство)	0.46	0.37
$K_6$ (без НДТ)	1.0	1.0
$K_6$ (с использованием НДТ)	0.25	0.1

Диффузная нагрузка от естественных и измененных ландшафтов, не подверженных в настоящее время сельскохозяйственному воздействию ( $L_c$  – в формуле (1)), формируется за счет поступления биогенных веществ из почв на поверхность водосбора:

$$L_c = \sum_{i=1}^{n_2} C_i y_i A_i / 1000, \quad (3)$$

где  $C_i$  – средние концентрации биогенных элементов в стоке с  $i$ -ого типа подстилающей поверхности ( $\text{мг/дм}^3 = \text{г/м}^3$ );  $y_i$  – слой стока с рассматриваемых типов подстилающей поверхности ( $\text{мм/год}$ );  $A_i$  – площади рассматриваемых типов подстилающей поверхности ( $\text{км}^2$ );  $n_2$  – количество типов рассматриваемых типов подстилающей поверхности. Ориентировочные значения  $C_i$ , экспериментально полученные в условиях северо-запада России и востока Финляндии, представлены в табл. 2.

Таблица 2

*Концентрации биогенных элементов в первичных звеньях гидрографической сети для различных типов подстилающей поверхности ( $\text{мг/дм}^3$ ) [1,2,17].*

Подстилающая поверхность	Естественные леса и болота	Урбанизированная территория	Прочие земли*
<i>P</i>	0.05	0.20	0.12
<i>N</i>	0.7	2.3	1.4

\*за исключением используемых в настоящее время сельхозугодий, расчет нагрузки для которых производится по формуле (2).

Вклад точечных источников биогенной нагрузки оценивается на основе официальной отчетной статистической информации о проведенных сбросах и в соответствии с официальными перспективными планами совершенствования системы очистки сточных вод на рассматриваемых предприятиях. В настоящее время основным официальным источником информации о сбросах

сточных вод являются статистические формы 2ТП (Водхоз) Министерства природных ресурсов и экологии. Данные, содержащиеся в этих формах, приводятся с годовым осреднением, что накладывает соответствующие ограничения на расчетные схемы и математические модели, в которых эти данные используются.

Натурное измерение атмосферной нагрузки  $L_a$  в формуле (1) обычно связано гидрохимическим анализом проб осадков и последующей интерполяцией и экстраполяцией данных. В исследованиях Института озероведения РАН получены следующие оценки атмосферной составляющей биогенной нагрузки: 2 кг  $P$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) и 465 кг  $N$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) для акватории Ладожского озера [5,8]; 9 кг  $P$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) и 820 кг  $N$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) для акватории Невской губы [6,11]. При расчетах биогенной нагрузки на водосбор Чудско-Псковского озера эстонскими специалистами использованы следующие величины: 5 кг  $P$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) и 770 кг  $N$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) [16]. По данным экспериментальных исследований Института водных проблем Севера РАН для условий Карелии атмосферная нагрузка биогенными веществами составляет 3,12 – 13,8 кг  $P$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) и 160 – 465 кг  $N$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) [9], а в 2013 ее значения равнялись 6,5 кг  $P$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) и 229.7 кг  $N$  /( $\text{км}^2\text{год}$ ) [10]. Картографическое обобщение информации об атмосферной нагрузке биогенных веществ на территорию северо-запада России содержится в работе [12]. По данным, имеющимся в распоряжении HELCOM [13], водосбор Российской части Финского залива расположен в двух зонах, характеризующихся атмосферным выпадением общего азота в 500-1000 и более 1000 кг/( $\text{км}^2\text{год}$ ). Очевиден существенный разброс в оценках атмосферных выпадений биогенных веществ на поверхности водосборов и водных акваторий.

Как правило, большая часть биогенных веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается различными звеньями гидрографической сети. Для расчета коэффициента удержания  $R$  в формуле (1) используются следующие эмпирические формулы [14,15,7]:

$$R = (1 - \frac{1}{1 + aq^b}), \quad (4)$$

где  $q$  – модуль стока (л / $\text{км}^2$  сек);  $a$  и  $b$  – безразмерные эмпирические параметры, значения которых приведены в табл. 3. Значение модуля стока  $q$  связано со слоем стока  $y$  (мм /год) эмпирическим соотношением  $q=0.03171y$ .

Таблица 3

Значения эмпирических параметров в формуле (4) [14,15]:

Вещество	Площадь водосбора	$a$	$b$
$P$	Для всех водосборов	26.6	-1.71
	<1000 $\text{км}^2$	41.4	-1.93
	1000 – 10000 $\text{км}^2$	21.7	-1.55
	>10000 $\text{км}^2$	28.9	-1.80
$N$	Для всех водосборов	6.9	-1.10
	<1000 $\text{км}^2$	3.5	-1.01
	1000 – 10000 $\text{км}^2$	5.8	-0.96
	>10000 $\text{км}^2$	7.9	-1.03

Удержание химических веществ русловой сетью оценивается на основе уравнения (4) в зависимости от характеристик стока и размеров водосбора. Для определения гидрологических характеристик заданной вероятности превышения могут быть использованы их аналитические или эмпирические кривые распределения. Альтернативным способом определения гидрологических характеристик, влияющих на формирование биогенной нагрузки на водные объекты, является использование гидрологической модели, позволяющей рассчитывать слой стока и расходы воды в зависимости от конкретных гидрометеорологических параметров.



Фоновая (естественная, природная) нагрузка биогенными веществами формируется за счет их выноса с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, которая происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности. При проведении расчета фоновой нагрузки на водосбор из рассмотрения исключаются все антропогенные источники загрязнения (точечные сбросы, внесение минеральных и органических удобрений, вынос с сельскохозяйственных и урбанизированных территорий). Таким образом, фоновая составляющая биогенной нагрузки на водный объект  $L_{nat}$ , т/год, сформированная естественными источниками, определяется следующим образом:

$$L_{nat} = (1 - R) [L_a + C_{nat} \cdot y \cdot (A - W/100) / 1000], \quad (5)$$

где  $C_{nat}$  – средняя концентрация биогенного элемента в стоке с естественной подстилающей поверхности (мг /дм<sup>3</sup>),  $y$  – слой стока (мм/год),  $A$  – общая площадь водосбора (км<sup>2</sup>),  $W$  – относительная площадь водной поверхности (% от общей площади водосбора).

Рассматриваемый в настоящей работе частный водосбор Ладожского озера (рис.1) по физико-географическому районированию относится к двум географическим странам-Фенноскандии (область Балтийского щита) и Русской равнине. Здесь развиты генетически разные ландшафты - сельговые в области Балтийского щита и холмисто - равнинные на Русской равнине. Основными процессами почвообразования являются подзолистый, дерновый, глеевый и болотный. Развитие этих типов почв наряду с промывным типом водного режима определяют высокую подвижность органического вещества в ландшафтах. Наибольшее количество водорастворимых гумусовых соединений образуется в почвах полугидроморфного и гидроморфного ряда. Поступление химических веществ в гидрографическую сеть с болотных систем переходного и верхового типа ограничено в периоды межени. Наибольший вынос органического вещества наблюдается с заболоченных лесов, сток с которых происходит практически постоянно. Карбонатность почвообразующих пород снижает вынос из почв в русловые воды, поскольку соли кальция и магния гумусовых кислот малорастворимы и накапливаются в органогенных горизонтах почв. Кроме того, в процессе гумусообразования в условиях нейтральной среды продуцируется больше гуминовых кислот, чем подвижных водорастворимых фульвокислот.

Общая площадь частного водосбора Ладожского озера составляет 67258 км<sup>2</sup>, площадь водных объектов на рассматриваемом водосборе – 2382 км<sup>2</sup>, естественных территорий (лесов и болот) - 59596 км<sup>2</sup>, обрабатываемых сельскохозяйственных полей – 360 км<sup>2</sup>, урбанизированных территорий – 958 км<sup>2</sup>, смешанных, заброшенных территорий, свалок и пр. – 3962 км<sup>2</sup>.

Информация о площадях сельскохозяйственных угодий и количестве домашних животных и птицы в 2014 г. в пределах частного водосбора Ладожского озера, необходимая для использования модели ИАЭП, основанной на уравнении (2), представлены в табл. 4. Рассчитанные значения биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных предприятиях рассматриваемой территории составили 1708.4 тN/год и 87.3 тP/год.

Биогенная нагрузка от точечных источников на поверхность водосбора по данным статистической отчетности 2ТП (водхоз) в 2014 году составила 810.0 тN/год 227.0 тP/год, прямые сбросы в озеро - 159.9 тN/год и 22.2 тP/год. Итоговые результаты моделирования биогенной нагрузки на частном водосборе Ладожского озера представлены в табл.5.



Рис. 1. Схема частного водосбора Ладожского озера.

Таблица 4

Площадь сельскохозяйственных угодий и количество домашних животных и птицы в пределах частного водосбора Ладожского озера

Район	Область	К			С			ОиК
		СХ	РС	В	ПТ	Л		
Лодейнопольский	Ленинградская	318,7	2400	3574	5850	15	1195	
Волховский	Ленинградская	4812	11614	6000	13958	32	971	
Кировский	Ленинградская	2028	1456	192	16720000	245	1349	
Тихвинский	Ленинградская	2102,1	6055	266	7833	33	431	
Тосненский	Ленинградская	5331	14220	122000	15425	508	1427	
Всеволожский	Ленинградская	5256,3	11228	9641	580120	149	1632	
Приозерский	Ленинградская	10525,9	21978	16302	16642	28	3452	
Лахденпохский	Респ. Карелия	238,5	227	103	3650	23	173	
Сортавальский	Респ. Карелия	335	386	241	4125	14	421	
Питкярантский	Респ. Карелия	2412	992	123	2467	2	348	
Олонецкий	Респ. Карелия	2689,8	9265	918	2267	3	370	
ВСЕГО		36049,3	79821	159360	17372337	1052	11769	

Примечание: СХ – площадь сельскохозяйственных угодий в пределах водосбора (га), КРС – крупный рогатый скот (гол.), СВ – свиньи (гол.), ПТ – птица (гол.), Л – лошади (гол.), ОиК – овцы и козы (гол.)

Результаты расчета формирования биогенной нагрузки на частном водосборе Ладожского озера для года средней водности ( $y = 300$  мм/год)

	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$
Суммарная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора, т/год	27118.4	1616.7
Удержание водосбором и его гидрографической сетью, т/год	9944.3	583.6
Вынос с водосбора, т/год	17174.1	1033.1
Прямой сброс, т/год	159.9	22.2
Нагрузка на водный объект, т/год	17334.0	1055.3
Диффузная составляющая нагрузки, т/год	16661.1	888.1
Фоновая (природная) составляющая нагрузки, т/год	15021.0	760.5
Модуль выноса, кг/(км <sup>2</sup> год)	257.7	15.7
Модуль фонового выноса, кг/(км <sup>2</sup> год)	223.3	11.3
Коэффициент выноса, безразм.	0.63	0.64

Таким образом, в соответствии с проведенными расчетами, современная биогенная нагрузка на гидрографическую сеть частного водосбора Ладожского озера для года средней водности составляет 27118.4 тN/год 1616.7 тP/год. Из них 17174.1 тN/год 1033.1 тP/год доходят непосредственно до озера. С учетом прямых сбросов в Ладогу нагрузка с частного водосбора составляет 17334.0 тN/год 1055.3 тP/год. По фосфору это составляет всего около 13 % от значения критической нагрузки, обеспечивающей переход Ладожского озера в эвтрофное состояние (8300 т/год) [8]. При этом, как показали результаты моделирования, фоновая (природная) компонента нагрузки составляет 87% по азоту и 72% по фосфору от значения суммарной нагрузки на озеро. Следует заметить, что достоверность сделанной оценки современной биогенной нагрузки на Ладожское озеро в значительной степени зависит от достоверности данных об источниках нагрузки, содержащихся в различных формах государственной статистической отчетности.

#### Литература:

1. Алябина Г. А., Сорокин И. Н. Миграция фосфора и органического вещества в системе «водоем–водосборная площадь» // Экологическая химия, 1997, 6 (3). С. 166–171.
2. Алябина Г. А., Сорокин И. Н. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах // Изв. РГО, 2001, 133 (1). С. 81–87.
3. Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1 (13). С. 78-85.
4. Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. 253 с.
5. Кондратьев С. А., Ефремова Л. В., Расплетина Г. Ф., Черных О. А., Веселова М. Ф., Кулибаба В. В., Свистов П. Ф. Оценка внешней нагрузки на Ладожское озеро. - Экологическая химия, 1997, 6 (2), с. 73-84.
6. Кондратьев С. А., Ефремова Л. В., Сорокин И. Н., Егоров А. Н., Кулибаба В. В., Родионов В. З. Оценка внешней нагрузки на Финский залив. - Экологическая химия, 1996, 5(4), с.240-249.
7. Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты – Региональная экология, 2011, 3-4, с.50-59
8. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. Под ред. Румянцева В. А., Дробковой В.Г. - СПб, Наука, 2002, 327с.
9. Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии. - Водные ресурсы, 2006, 33(1), с.111-118.
10. Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно-обоснованных предложений по её снижению - СПб, ИНОЗ РАН, договор № 57–НИР/ФЦП-2015, 2015, 231 с.

11. Финский залив в условиях антропогенного воздействия. - Под ред. В. А.Румянцева и В. Г. Драбковой, Изд-во НИИХ СПбГУ, 1999, 363 с.
12. Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб., Гидрометеиздат, 1993, 278 с.
13. Atmospheric Supply of Nitrogen, Lead, Cadmium, Mercury and Dioxins/Furans to the Baltic Sea in 2010 - EMEP Centres Joint Report for HELCOM, EMEP/MSC-W TECHNICAL REPORT 2/2012, 158 p.
14. Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system.- Weissensee Verlag Publ., Germany, 2007, 337 p.
15. Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. - Hydrobiologia, 1999, 410: 111–122.
16. Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998-1999. - Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999, 66 p.
17. Rekolainen S. 1989. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // Aqua Fennica, 1989, 19 (2): 95 –107.

### **NUTRIENT LOAD ON LAKE LADOGA FROM IMMEDIATE CATCHMENT IN MODERN CONDITION**

Sergey A. Kondratyev  
DSc, Deputy Director  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
e-mail: kondratyev@limno.org.ru

Yuri A. Bryhanov  
PhD, Head of Laboratory  
Institute of Agroengineering and Ecological Problems in Agriculture  
e-mail: sznii@yandex.ru

Natalia V. Victorova  
PhD, Docent  
Russian State Hydrometeorological University  
e-mail: nata\_vic@mail.ru

Marina V. Shmakova  
PhD, Sc. Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Natalia S. Oblomkova  
Lead Engineer  
“Ecology and Business” NGO  
e-mail: ivaskova.natali@yandex.ru

Elena G. Markova  
Sc. Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
e-mail: adelmonamour@mail.ru

*Abstract:* Using the methods of mathematical modeling the estimation of the modern external nitrogen and phosphorus load on Lake Ladoga from the immediate catchment was carried out. The calculated values of the load amounted to 17334.0 tN / year and 1055.3 tP / year (for mean annual runoff). The share of the background (natural) load accounted for 87% of total nitrogen and 72% of the total load values of the lake. Modern phosphorus load from immediate catchment does not exceed 13% of the value of the critical load, ensuring the transition of Lake Ladoga in eutrophic state.

*Key words:* nutrient load, mathematical modeling, point and diffuse sources

## ИДЕЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА PAN-SHARPENING ДЛЯ ОЗЕРА ГУРОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ MSI (SENTINEL1) И MODIS

Антон Андреевич Коросов

к.ф.м.н, руководитель группы

Центр по Окружающей среде и Дистанционному

Зондированию им. Нансена, Берген, Норвегия

E-mail: [anton.korosov@nersc.no](mailto:anton.korosov@nersc.no)

Дмитрий Викторович Поздняков

д.ф.м.н, профессор

Научный фонд «Международный Центр

по Окружающей Среде и Дистанционному

Зондированию им. Нансена», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)

Артем Владимирович Моисеев,

младший научный сотрудник,

Научный фонд «Международный Центр

по Окружающей Среде и Дистанционному

Зондированию им. Нансена», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [artem.moiseev@niersc.spb.ru](mailto:artem.moiseev@niersc.spb.ru)

*Аннотация:* С целью повышения пространственного и спектрального разрешения получаемой информации была применена техника объединения снимков. Данная методика позволяет, используя разные источники данных, получить изображение с необходимым пространственным и спектральным разрешением. Реализация алгоритма основана на использовании искусственной нейронной сети, являющейся более мощным и гибким, по сравнению с традиционными методами, способом обработки информации. Для проверки эффективности, методика была применена к данным с датчиков MSI/Sentinel2 и MODIS/Aqua полученных над акваторией озера Гурон.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, объединение снимков, спектральное разрешение, пространственное разрешение, нейронные сети, озеро Гурон

### 1. Предпосылки развития алгоритма

С точки зрения машинной обработки изображений мульти-сенсорное объединение снимков является процессом комбинирования информации полученной с двух или более снимков в одно изображение. В результате, полученное изображение будет нести в себе больше информации по сравнению с исходными снимками.

В то же время, повышение доступности информации с датчиков дистанционного зондирования дает развитие большому количеству различных алгоритмов объединения/комбинирования исходных данных. При решении некоторых задач, обработка снимков требует наличия одновременно высокого пространственного и спектрального разрешения для отдельного снимка, однако, большая часть методологий не способна обеспечить необходимое качество получаемых данных.

Методика объединения изображений позволяет использовать разные источники данных и в результате, получить изображение с необходимым пространственным и спектральным разрешением. Однако, объединение снимков с использованием стандартной методики может привести к появлению искажений.

### 2. Математическая реализация алгоритма

Существует много методов объединения снимков. Один из наиболее простых методик – это фильтрация высоких частот. Более поздние методы, были основаны на дискретном вейвлет-

преобразовании, однородный фильтрующий банк и пирамида Лапласа. По сравнению с традиционным линейным и простым нелинейным анализом, более мощными и самоприспосабливающимися к распознаванию образов являются методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). Метод, основанный на ИНС позволяет, используя нелинейную функцию отклика, путем многократного повторения (обучения ИНС), найти взаимосвязь между входными и выходными данными из независимой выборки (массива обучения).

Входной слой сети состоит из нескольких нейронов, каждый из которых представляет отдельный, нормированный, фактор полученный из изображений А и Б. Сигмоидная функция активации каждого из нейронов:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

Внутренний (скрытый) слой сети, также состоит из нескольких нейронов. Выходной слой содержит один нейрон.  $i$ -ый элемент из внешнего (входного) слоя соединен с внутренним слоем посредством весовой функции  $W_{ij}$ , а вес между нейронами внутреннего слоя сети и выходным нейроном выражен через  $V_j$  (в данном случае  $t = 1$ ). Весовая функция используется для моделирования и оценки отклика взаимосвязи между особенностями объединенного (выходного) изображения и соответствующими особенностями исходных изображений (изображения А и Б). Модель основанная на ИНС описывается как:

$$Y = \frac{1}{1 + \exp \left[ - \left( \sum_{j=1}^q V_j H_j - h_j \right) \right]} \quad (2)$$

где,  $Y$  – значение пикселя в объединенном изображении, полученном с помощью нейронной сети,  $q$  – число узлов внутреннего слоя сети (в данном случае  $q \sim 8$ ),  $V_j$  – вес между  $j$ -м внутренним слоем и выходным слоем (в данном случае был использован один выходной нейрон),  $h_j$  – пороговое значение выходного нейрона,  $H_j$  – выходное значение  $j$ -ого нейрона из внутреннего слоя сети:

$$H = \frac{1}{\exp \left[ - \left( \sum_{j=1}^n W_{ij} a_i - h_j \right) \right]} \quad (3)$$

где,  $W_{ij}$  – вес между  $i$ -ым входным узлом и  $j$ -ым узлом внутреннего слоя сети,  $a_i$  – величина  $i$ -ого входного значения,  $n$  – количество узлов входного слоя (в данной работе  $n \sim 5$ ),  $h_j$  – пороговая величина для  $j$ -th нейрона внутреннего слоя сети.

На первом шаге нейросетевого объединения изображений, два исходных снимка раскладываются на несколько блоков размером  $M$  на  $N$ . Затем, из двух соответствующих блоков извлекаются их особенности и, таким образом формируется нормированный вектор характеристик для нейронной сети. Оценка эффекта объединения, обычно, оценивается через пространственную частоту, видимость, и контраст края. На следующем шаге формируется массив обучения для нейронной сети. Нейронная сеть (НС) является универсальной аппроксимирующей функцией, адаптирующейся к любой нелинейной зависимости, обнаруженной в наборе обучающих данных. Однажды обученная НС, может запомнить полученные функциональные зависимости и использоваться в следующих расчетах. С данной точки зрения, концепция НС может использоваться для разработки нелинейных моделей объединения данных полученных с разных датчиков.

Метод основанный на ИНС, использует возможности искусственной нейронной сети узнавания; образов возможности и, между тем, ее способность к обучению делает возможным



настройку процесса объединения снимков. Опыт проведения исследований показывает, что методы, основанные на НС, являются более выигрышными, по сравнению с традиционными статистическими методами, особенно при наличии лакун в данных и/или сильной зашумленности исходных данных. Данный подход часто является эффективным при решении задач землепользования и классификации земного покрова. Также, структура множественного ввода и вывода делает возможным объединение крупномасштабных данных, например длительных временных рядов или гиперспектральных данных.

### 3. Описание входных и выходных данных

Спутниковые данные, поступающие на вход алгоритма, должны отражать проявление мезомасштабных процессов. Более того, два массива исходных данных должны обладать определенными преимуществами (каждый из снимка своими), например, один из них обладает высоким пространственным, а другой, высоким спектральным разрешением. Подобные данные могут быть получены с ИК или оптического спутникового датчика, что, следовательно, делает возможным использование таких существующих датчиков, как: Aqua/MODIS, Terra/MODIS, Terra/ASTER, NPP/VIIRS Sentinel2/MSI, Sentinel3/OLCI и Sentinel3/LSTSR.

Выбор исходных данных ограничивается только возможностями чтения и интерпретации программного обеспечения Nansat (см. главу 4). На данный момент Nansat способен использовать данные более чем 6 разных форматов (таких как netCDF, GeoTIFF, HDF4, HDF5, OpenDAP, GRIB, и т.д.) и может транслировать данные 1 и 2 уровня либо из внутренней модели состоящей из более чем 25 спутниковых датчиков, либо из метеорологических или гидрологических моделей. Таким образом, для алгоритма объединения может использоваться любой из указанных выше датчиков.

### 4. Научное обоснование направления разработки

Описанный выше подход к объединению данных в перспективе будет применен к данным датчиков MSI/Sentinel2 и OLCI/Sentinel3. В видимом диапазоне MSI регистрирует излучение с пространственным разрешением в 10 м на длинах волн 490, 560 и 665 нм; с 20 м разрешением на 705 нм; и с 60м разрешением на 443 нм. В видимом диапазоне OLCI регистрирует сигнал с пространственным разрешением в 300 м на длинах волн в 400, 412, 443, 490, 510, 560, 620, 665, 673, 681, 708 нм Данные с обоих датчиков будут использованы для получения искомого продукта из снимка с спектральным разрешением датчика OLCI и пространственным разрешением в 20 м.

### 5. Спецификация конечного продукта

Конечный продукт сохраняется в географической проекции сетки в совместимом со стандартным в настоящее время форматом файла, известного как климат и прогноз методанные (CF-conventions файле, формат netCDF) и содержит массивы значений более высокого качества. Выбор геометрических параметров сетки определяется соображениями оптимизацией занимаемого пространства на диске.

### 6. Возможные проблемы и их решения

**Проблема 1.** Наличие шума в исходных данных может уменьшить взаимосвязь сигнал-шум, что приведет к ухудшению качества объединения.

**Решение 1.** Применение и сравнение 2D фильтрации, примененной к исходным снимкам и снимкам, полученным в результате объединения.

**Проблема 2.** Отсутствие достаточного количества подходящих для систематического объединения данных (свободных от шума и облачности).

**Решение 2.** Применение и тестирование данных мульти-сенсорного объединение для сравнения с данными, полученными аналогичными датчиками на разных платформах (например, VIIRS, MODIS и OLCI) или различными датчиками и продуктами (например, хлорофилл а и ТПМ).

### 7. Применение алгоритма для объединения данных MSI/Sentinel2 и MODIS/Aqua

В данном сообщении вышеописанный подход был реализован и протестирован в виде алгоритма объединения двух снимков, полученных с MSI/Sentinel2 25 декабря 2015 года в 19:55 UTC и MODIS/Aqua, 25 декабря в 18:20 UTC над заливом Сагино, озера Гурон (Рис.1). Только одна гранула в изображении с MSI/Sentinel, оказалась достаточно свободной от облаков и была

использована для объединения. Соответствующие данные MODIS были незначительно загрязнены облаками в южной части рассматриваемого региона.

Данные MSI/Sentinel, использованные при слиянии, представляют собой значения излучения на поверхности атмосферы ( $\text{Вт м}^{-2}$ ) на шести VNIR полосах: 443 нм, 490 нм, 560 нм, 665 нм, 740 нм, 783 нм, 842 нм, 865 нм и 940 нм. Пространственное разрешение для снимка MSI было увеличено до 60 м (разрешение первой полосы). Канал 10 (1375 нм) использовался для маскирования облачности: пиксели, для которых величина излучения на поверхности атмосферы была больше  $30 \text{ Вт м}^{-2}$ , исключались из дальнейшего анализа. Значения в некоторых полосах датчика MSI имеют логарифмически нормальное распределение частот и данные во всех диапазонах были лог-масштабированы. Из-за наличия шума в некоторых из групп, для обучения нейронной сети, данные во всех полосах были пространственно сглажены фильтром Гаусса ( $\sigma = 2 \text{ пх.}$ ).

Данные MODIS представляли собой значения коэффициента отражения для дистанционного зондирования водной поверхности  $R_{rs}$  ( $\text{sr}^{-1}$ ) в трех спектральных каналах: 443, 555 и 667 нм. Эти каналы были выбраны для создания RGB изображения и тестирования работоспособности алгоритма объединения во всем видимом диапазоне. Данные MODIS были перепроецированы таким образом, что бы обеспечить такое же разрешение (60 м) как и данные из первого канала MSI.

Для обучения нейронной сети для каждого из каналов MODIS был использован массив данных из 532101 пикселей, не загрязненных облачностью. Обучение сети происходило в 750 эпохах с постоянно уменьшающейся ошибкой. Это говорит о том, что сеть не была переобучена.

Сравнение значений рассеяния полученных с помощью MODIS и с помощью объединения данных показывает высокую степень согласованности (значения  $R_{rs}$  находились в диапазоне от 0.85 до 0.92 нм) и подтверждает, что разработанный алгоритм может быть успешно использован для объединения данных с датчиков Sentinel2 и Sentinel3.

### FUSION OF DATA FROM MSI/SENTINEL2 AND OLCI/SENTINEL3

Anton Korosov

Ph. D., group leader

Nansen Environmental and  
Remote Sensing Center, Bergen Norway

E-mail: [anton.korosov@nersc.no](mailto:anton.korosov@nersc.no)

Dmitry Pozdnyakov

Dr. Sc. (Phys.-Math.), professor

Nansen International Environmental and  
Remote Sensing Center, St. Petersburg, Russia

E-mail: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)

Artem Moiseev,

junior scientist, Nansen International Environmental  
and Remote Sensing Center, St. Petersburg, Russia

E-mail: [artem.moiseev@niersc.spb.ru](mailto:artem.moiseev@niersc.spb.ru)

*Abstract:* The image fusion is the process of combining relevant information from two or more images into a single image. This technique allows the integration of different information sources what makes the resulting image more informative than any of the input images. Realization of the algorithm is based on utilization of the method of artificial neural networks (ANN), which is much more powerful and self-adaptive in pattern recognition as compared to traditional linear and simple nonlinear analyses. The fusion algorithm was tested on a pair of images acquired by MSI/Sentinel2 and by MODIS/Aqua over the Saginaw Bay of Lake Huron.

*Keywords:* remote sensing, image fusion, spatial resolution, spectral resolution, neural networks, Lake Huron



## БИООПТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИ МЕЛКИХ ВОД ОЗЕРА МИЧИГАН

Антон Андреевич Коросов  
к.ф.м.н, руководитель группы  
Центр по Окружающей среде и Дистанционному  
Зондированию им. Нансена, Берген, Норвегия  
E-mail: [anton.korosov@nersc.no](mailto:anton.korosov@nersc.no)  
Дмитрий Викторович Поздняков  
д.ф.м.н, профессор  
Научный фонд «Международный Центр  
по Окружающей Среде и Дистанционному  
Зондированию им. Нансена», Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)  
Роберт Шухман  
доктор философии, вице-президент  
Мичиганский технический институт,  
Анн Арбор, США  
Артем Владимирович Моисеев,  
младший научный сотрудник,  
Научный фонд «Международный Центр  
по Окружающей Среде и Дистанционному  
Зондированию им. Нансена», Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [artem.moiseev@niersc.spb.ru](mailto:artem.moiseev@niersc.spb.ru)

*Аннотация:* Для извлечения из спутниковых снимков параметров качества воды в оптически мелких районах озера Мичиган, был разработан новый биооптический алгоритм. Он основан на модели прямого переноса излучения, гидрооптической модели озера Мичиган и многомерной оптимизации и позволяет получать оценку концентрации всех основных оптически активных веществ в областях с различным типом дна. Тестирование алгоритма проводилось с использованием данных MODIS-Aqua, синхронизированных *in situ* данными. В результате были получены спектральные сигнатуры подповерхностного сигнала отражения при дистанционном зондировании и концентрации цветообразующих компонентов в диапазоне глубин от 2 до 15 м. Полученные результаты показали преимущество разработанного метода по сравнению с алгоритмом ОС4.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, альbedo дна, оптически мелкие воды, лимнология, озеро Мичиган.

### 1. Введение

Озеро Мичиган является вторым в мире по площади водосбора и третьим по площади в системе североамериканских Великих озер [Edsall and Munawar, 2011]. Благодаря интенсивному стоку и активной человеческой деятельности, в воду поступает большое количество взвешенных веществ (ВВ) и загрязнителей. Сильные ветра в зимний и весенний период приводят к интенсивному перемешиванию и взмучиванию, особенно в прибрежной мелководной зоне, что также в значительной мере обуславливает биогеохимические условия вод. Таким образом, экологический мониторинг прибрежной зоны озера представляет собой достаточно важную задачу.

Из-за высокой прозрачности, эффективное использование дистанционного зондирования в областях оптически мелких вод (ОМВ) является сложной методологической задачей. Возрастающее использование мульти- и гипер-спектральных датчиков для изучения прибрежных

акваторий дало толчок развитию улучшению методов решения прямой и обратной задачи, многомерной оптимизации, развитию аналитических методов, метода главных компонент и нейросетевых алгоритмов. Недостатком мультиспектральных датчиков является ограниченное количество регистрируемых полос. Несмотря на это, их использование внесло большой вклад в изучение оптической системы, охватывающей дно и водный столб.

Наиболее широкое распространение при исследовании оптически мелких вод нашли два подхода. Первая методика была предложена Лайзинга. Для создания батиметрии он переходил от подповерхностного к поверхностному отражению и восходящей освещенности, и использовал метод линейной трансформации для создания индексов из полос дистанционного зондирования. Данный подход также подходит для классификации типов дна. Другой подход был предложен Ли и заключался в применении гипер-спектральных данных для одновременного поиска глубины дна и свойств водного столба, путем минимизации ошибки моделируемых и измеренных значений спектра отражения при дистанционном зондировании. Однако, эта методика не предназначена для восстановления батиметрии или концентрации цветообразующих веществ в условиях слабозагрязненных вод.

В данной работе, представлена разработка мультиполосного биооптического алгоритма восстановления для OMB озера Мичиган, **BOREALI-OSW (Bio-Optical REtrieval ALgorithm for Optically Shallow Waters)**. Разработанный алгоритм, позволяет восстановить концентрации основных оптически активных веществ из сигнала отражения при дистанционном зондировании для чистых вод при различных глубинах и типах дна. Необходимо отметить, что предложенный алгоритм является развитием ранее предложенного алгоритма BOREALI [Korosov et al., 2009], хорошо зарекомендовавшего себя при оценке мутных и глубоких водных объектов в Северной Европе и Северной Америке [Korosov et al., 2009, Shuchman et al., 2006].

При реализации BOREALI-OSW использовалась многомерная оптимизация Левенберга–Марквардта и, в данном исследовании, недавно созданная многомерную гидрооптическая модель озера Мичиган [Shuchman et al., 2013a].

Одним из важных достоинств BOREALI-OSW является то, что он позволяет оценить не только концентрации хлорофилла, но и взвешенных органического вещества и растворенного органического вещества (POB), в отличии от других алгоритмов, дающих оценки только общему количеству взвешенного вещества (BB) или взвешенного органического вещества и поглощение окрашенным POB. Это различие очень важно, как для исследования механизмов поступления веществ в водный объект, так и для экологического моделирования.

## 2. Физико-географическая характеристика озера Мичиган

Озеро Мичиган (41°35' – 46° с.ш.; 85° – 88° з.д.) является одним из четырех североамериканских Великих озер, образовавшихся в конце последнего ледникового периода (~10000 лет назад). Благодаря своей природе формирование, морфометрии (средняя глубина 85 м), тепловому режиму и составу почв дна, первоначально озеро являлось олиготрофным. Однако в наше время, благодаря воздействию многих факторов (потепление климата, загрязнение через атмосферные осадки, человеческая деятельность), озеро можно характеризовать как олиго-мезотрофное [Mida et al., 2010].

В гидродинамическом режиме озера выделяются весенний и осенний период вертикально перемешивания, разделенных длительным периодом термической стратификации. Подобный режим обуславливает не только вертикальный профиль температуры воды, но и на распределение питательных веществ, и, как следствие, сезонные колебания биомассы фитопланктон и концентрации растворенного кислорода.

Фауна озера представлена 186-ю видами, среди которых *quagga* и *zebra mussels*, завезенные в озеро с балластными водами судов. Важно отметить, что подобное видовое «вторжение» нанесло не только серьезный ущерб экосистеме озера, но и значительно, через фильтрацию вод, повлияло на оптические характеристики воды, сделав их более прозрачными (с 2.5 м в 1970 г. до 20 м в 2010 г.). Это привело к увеличению потока солнечного излучения достигающего дна в мелких прибрежных водах.

Фитопланктон представлен двумя группами: сине-зеленые и зеленые водоросли и диатомовые и жгутиковые. Характерная концентрация хлорофилла в пелагической части озера не достигает  $1 \text{ мг/м}^3$ , а в прибрежной находится около  $2.5\text{-}3 \text{ мг/м}^3$ . В области впадения рек концентрация хлорофилла может достигать  $10 \text{ мг/м}^3$  [Pozdnyakov et al., 2005]. Подобные области также характеризуются высокими концентрациями РОВ  $<3 \text{ г}^*\text{С/м}^3$ .

Концентрации ВВ в пелагической области, в период термальной стратификации обычно  $<1 \text{ г/м}^3$ , а в прибрежной (особенно в области впадения рек) может достигать  $3 \text{ г/м}^3$ .

### 3. Исходные данные

В выполненной работе использовались данные радиометрии измеренной концентрации хлорофилла и дистанционного зондирования. Данные *in situ* были получены в результате экспедиционной работы выполненный в районе побережья Sleeping Bear Dunes и Saugatuck city, выполненных в 2012 и 2013 году, и были представлены измерением падающего ( $\text{Вт/м}^2$ ) и восходящего ( $\text{Вт/ср}^*\text{м}^2$ ) излучения на уровне  $\sim 1$  м над (0+) и под (0-) поверхностью воды. На каждой станции были получены по 20 спектров освещенности и цветности, которые в дальнейшем были осреднены. Данные регистрировались в диапазоне от 412 до 709 нм, однако, из-за высокой неточности в ультрафиолетовой и красной части спектра, в расчетах использовались значения, полученные в диапазоне от 443 до 620 нм. Также, на каждой станции, были произведены измерения концентрации хлорофилла

Для верификации алгоритма были использованы мультиспектральные данные с датчика MODIS-Aqua в оптическом диапазоне (412-678 нм). По аналогичным причинам из возможного спектра использован только участок с 443 по 636 нм (сигнал в полосе 636 нм был интерполирован между двумя ближайшими полосами). Разница во времени, между данными *in situ* и данными дистанционного зондирования составила примерно 3-4 часа.

### 4. Результаты

При решении задачи дистанционного зондирования оптически мелких вод для восстановления концентрации цветообразующих компонентов под влиянием разного влияния отражения света от дна, преследовались две цели. Во-первых, с помощью моделирования различных вариантов спектра подповерхностного отражения при дистанционном зондировании  $R_{rsw}$ , мы оценили изменение восходящего сигнала при различных глубинах и типах дна. После чего, мы перешли к обратной задаче моделирования, для проверки концентрации цветообразующих веществ. С этой целью был разработан алгоритм восстановления (BOREALI-OSW), специально настроенный для изучения оптически мелких вод.

Во-вторых, полученный алгоритм был применен для расчета с помощью данных радиометрии, спутниковых данных, и *in situ* измерений хлорофилла, полученных одновременно с выполнением спутниковой съемки. Для решения прямой задачи были использованы гидрооптическую модель, разработанную для озера Мичиган и рассмотрены наиболее характерные типы дна: песок, *Cladophora/Chara*, известковые скалы и ил.

Полученные результаты показали, что даже при очень низких концентрациях цветообразующих веществ (менее 0.01 в соответствующих единицах) оптическое влияние дна становится не различимым, при глубинах дна больше 25 метров. В водах, с концентрацией ВВ около  $0.5 \text{ г/м}^3$  (при бесконечно малой концентрации хлорофилла и окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ)) оптическое влияние дна теряется при глубинах менее 10 метров. Аналогичные результаты получаются если  $a_{CDOM}$  около  $0.5 \text{ г/м}^3$  (при бесконечно малых концентрациях хлорофилла и ВВ).

Анализ чувствительности алгоритма к шуму показал, что чем меньше глубина и выше альbedo дна, тем выше ошибка в получаемых концентрациях. Несмотря на это, даже в случае песчаного дна (наивысшее альbedo из рассмотренных) и глубины 5 м, 10% погрешность в определении альbedo приводит к 18%, 28% и 10% ошибке в концентрациях хлорофилла, ВВ и ОРОВ соответственно, а при глубине 10 м, величина шума уменьшается соответственно до 4%, 10% и 4%.

Изучение зависимости среднеквадратичной ошибки в получаемых концентрациях от шума во входных значениях глубины  $H$  и альбедо дна  $A$  показало, что величина ошибки может достигать 18%, ~30% и 10% для хлорофилла ВВ и ОРОВ, соответственно при шуме в  $H = 10\%$ , однако, значительно увеличивается (до 55% для хлорофилла и ВВ и до 17% для ОРОВ) при шуме в  $A = 10\%$ .

Численная оценка эффективности алгоритма, полученная для реальных данных оз. Мичиган, хорошо показывает, что на глубинах менее 10 метров его применение к данным радиометрических измерений показывает значительно более близкие к лабораторной концентрации хлорофилла, чем при расчете, не учитывающем влияние дна. При увеличении глубины данная разница постепенно нивелируется, однако, остается заметной, что еще раз подтверждает необходимость использования алгоритма BOREALI-OSW.

Применение алгоритма BOREALI-OSW данным полученным с MODIS-Aqua позволило получить менее точные концентрации хлорофилла, по сравнению с оценками радиометрических измерений. Однако, они оказываются значительно ближе к достоверным, чем оценки выполненные без учета влияния дна. Существует несколько причин, обуславливающих менее точные результаты. В первую очередь, это неточность атмосферной коррекции. Во-вторых, это низкое пространственное разрешение данных MODIS-Aqua (1x1 км), что говорит о невозможности точного учета глубины дна и пространственного распределения хлорофилла, по сравнению со стационарными наблюдениями. В-третьих, несмотря на то, что суточная изменчивость концентрации хлорофилла обычно находится в пределах 10%, разница между временем выполнения станции и спутникового снимка, составила 3-4 часа, что так же может внести свой вклад в наблюдаемое расхождение между спутниковыми и *in situ* измерениями.

Можно предположить, что с увеличением точности батиметрии дна в прибрежной области, позволит увеличить точность получаемых концентраций. Тем не менее, ни одно из усовершенствований упомянутых выше, не сможет не только решить, но даже уменьшить проблему правильной оценки пути излучения. Несомненно, серьезной проблемой остается нечеткость атмосферной коррекции, следовательно, необходимо приложить основные усилия в этом направлении.

Несмотря на вышеупомянутые неопределенности, связанные с бортовыми данными, было показано, что оценки концентрации хлорофилла, получаемые с помощью BOREALI-OSW, являются более точными, чем оценки, полученные без учета оптического влияния дна. Таким образом полученный алгоритм представляет собой эффективный инструмент изучения оптически мелких вод.

В заключении, нужно отметить, что при наличии необходимых исходных данных, а также разумном учете указанных выше ограничений и наличии соответствующих гидрооптических моделей, алгоритм BOREALI-OSW можно применять для экологического мониторинга разных прибрежных морских и озерных вод.

#### Литература:

1. Edsall T. and Munawar M. (Eds.). State of Lake Michigan: Ecology, Health and Management. Ecovision World Monograph. Wayne state University Publ.: Detroit. 2011. 639 p.
2. Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Folkestad A., Pettersson L. H., Srensen K., Shuchman R. Semi-empirical Algorithm for the Retrieval of Ecology-Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments. Algorithms. 2009. Vol. 2. P. 470–497.
3. Shuchman R., Korosov A., Hatt C., Pozdnyakov D., Means J., Meadows G. Verification and application of a bio-optical algorithm for Lake Michigan using SeaWIFS: a 7-year inter-annual analysis. Journal of Great Lakes Research. 2006. Vol. 32. P. 258-279.
4. Shuchman R. A., Leshkevich G., Sayers M. J., Johengen T. H., Brooks C. N., Pozdnyakov, D. An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data. Journal of Great Lakes Research. 2013a. Vol. 32. P. 14-33.

5. Mida J. L., Scavia D., Fahnenstiel G. L., Pothoven S. A., Vanderploeg H. A., Dolan D. M. Long-term and recent changes in southern Lake Michigan water quality with implications for present trophic status. *Journal of Great Lakes Research*. 2010. Vol. 36/ P. 42-49.

6. Pozdnyakov D. V., Shuchman R. A., Korosov A. A., Hatt C. Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes. *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 97. P. 352- 370.

## **BIO-OPTICAL RETRIEVAL ALGORITHM FOR THE OPTICALLY SHALLOW WATERS OF LAKE MICHIGAN**

Anton Korosov  
Ph. D., group leader  
Nansen Environmental and  
Remote Sensing Center, Bergen Norway  
E-mail: [anton.korosov@nersc.no](mailto:anton.korosov@nersc.no)

Dmitry Pozdnyakov  
Dr. Sc. (Phys.-Math.), professor  
Nansen International Environmental and  
Remote Sensing Center, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)

Robert Shuchman  
Ph.D., Oceanic Sciences / Natural Resources,  
Co-Director, Michigan Tech Research Institute,  
Ann Arbor, USA

Artem Moiseev,  
junior scientist, Nansen International Environmental  
and Remote Sensing Center, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [artem.moiseev@niersc.spb.ru](mailto:artem.moiseev@niersc.spb.ru)

*Abstract:* A new bio-optical retrieval algorithm, based on a forward radiation transfer model, LM specific hydro-optical model and the multivariate optimization technique is developed for operational retrieval from satellite data of water quality parameters in lakes optically shallow areas. MODIS-Aqua satellite data acquisitions for determining CPA concentrations were synchronized with in situ radiometric measurements, as well as identification of bottom type and depth. Retrieved were realistic values of spectral signatures of subsurface remote sensing reflectance and CPA concentrations within the ranges of depth (2 m–15 m depending on the CPA concentration vector and bottom type), at which the bottom optical impact was detectable. Application of the developed operational tool to processing MODIS-Aqua data (matching up the location and timing of in situ CPA and radiometric measurements) has convincingly shown its advantage over the OC4 performance in lacustrine optically shallow waters at all sampling stations.

*Keywords:* optical remote sensing; Attenuation; surface albedo; optically shallow waters; limnology; Lake Michigan.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМУ  
ИЗУЧЕНИЮ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

Наталья Андреевна Костромина,  
4 курс, Институт Наук о Земле СПбГУ  
E-mail: [kostromina132@gmail.com](mailto:kostromina132@gmail.com)

Александр Евменьевич Рыбалко,  
д.г.-м.н., профессор кафедры геоморфологии,  
Институт Наук о Земле СПбГУ  
Андрей Станиславович Локтев,  
к.г.-м.н., главный геолог,

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В.Ломоносова»

*Аннотация:* В данной статье представлены новые данные по четвертичной геологии Петрозаводской губы Онежского озера, полученные в ходе полевых работ, включающие в себя литостратиграфические колонки и их корреляцию.

*Ключевые слова:* озерные отложения, четвертичные отложения, Онежское озеро

В настоящее время Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, и Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН выполняют совместную программу по изучению четвертичной геологии и геоморфологии озерных бассейнов восточной периферии Балтийского кристаллического щита. В выполнении работ участвуют студенты Санкт-Петербургского и Московского Государственного университетов. В рамках этой программы в мае 2016 года проводились полевые работы на полигоне, расположенном в Петрозаводской губе Онежского озера. Данный полигон рассматривался как первый ключевой участок при изучении четвертичного покрова и донных ландшафтов Онежского озера. В состав работ входили: многоканальное сейсмоакустическое профилирование, гидролокация бокового обзора, а также геологический пробоотбор. Выбор точек для него проводился по результатам интерпретации геофизических работ.

Всего было выбрано 7 станций для отбора колонок донных отложений, которые различались геоморфологическими условиями и особенностями строения четвертичного покрова, в частности выбором участков выхода на поверхность озерного дна разновозрастных сейсмоакустических комплексов (рис.1). В период с 26 по 29 мая на каждой из станций с помощью прямооточной грунтовой трубки с глубины от 21 до 24 метров было отобрано несколько колонок (2-3) на различные виды анализов (в том числе палеонтологический), одна из трубок разрежалась и описывалась в полевых условиях, а так же разбиралась на образцы на литологический анализ. Кроме того, на станциях ONG-2, ONG-4, ONG-7 (выбранных на основе описания колонок донных отложений, и наличия в них газопроявлений) был проведен отбор колонок для анализа содержания газа по методике извлечения газовой компоненты Head space и сделано повторное описание колонок. На основе полевого описания были построены литостратиграфические колонки. Впоследствии была проведена корреляция колонок между собой и с данными, полученными в результате сейсмоакустической съемки, и по этим данным построена сводная литостратиграфическая колонка.





Рис. 1. Карта расположения станций пробоотбора.

Общая мощность изученных четвертичных отложений составляет 7,54 метра (получена в результате суммирования максимальных мощностей, выделенных в результате корреляции разных горизонтов отдельных колонок). По результатам полевого описания и сопоставления с существующей опорной стратиграфической региональной легендой выделено 6 горизонтов, отличающихся друг от друга в литологическом и фациальном отношении. (рис 2, рис.3, рис. 4)

*Озерные нефелоидные отложения верхнеголоценового возраста (InH<sub>3</sub>)* Горизонт представлен глинистым алевритом, цвет которого в разных колонках меняется от зеленовато-бурого до оливково серого. Наблюдаются скопления гидротроилита. Вниз по интервалу отмечается увеличение песчаных частиц. В колонках, где был отмечен контакт с нижележащей толщей, контакт описан как эрозионный, подчеркнутый скоплением песчаного материала. Горизонт наблюдается во всех описанных колонках, наибольшей мощности достигает в колонках ONG-2(2,17) и ONG-4(7,18). Вскрытая мощность составляет 3,2 м.

*Озерные нефелоидные отложения средне-верхнеголоценового возраста (InH<sub>3-2</sub>)*. Горизонт представлен в различных колонках глинистым алевритом, алевропелитом и пелитом. Отмечается преобладание пелитовых частиц. Цвет преимущественно серый, наблюдаются небольшие стяжения гидротроилита в нижней части толщи. Горизонт представлен в колонках ONG-1(1), ONG-5(9), ONG-6(12), ONG-7(14). При повторном изучении керна на станции ONG-5 (колонка ONG-5(20)) горизонт выпадает. Максимальной мощности достигает в колонке ONG-6(12). Вскрытая мощность составляет 1,2 м.

*Озерные нефелоидные отложения среднеголоценового возраста (InH<sub>2</sub>)*. Горизонт представлен серыми алевропелитами, с нечеткой диагенетической полосчатостью, с тонкими полосами, образованными гидротроилитом. Горизонт выделен в колонках ONG-1(1), ONG-5(9,20), ONG-6(12), ONG-7(14). Максимальная мощность наблюдается в колонке ONG-7(14). Вскрытая мощность составляет 0,5 м.

*Озерные нефелоидные отложения нижнеголоценового возраста (InH<sub>1</sub>)* Горизонт представлен гомогенными алевропелитами и пелитами пепельно-серого цвета (в колонке ONG-7(14) цвет приобретает оливковый оттенок) наблюдаются включения псаммитовой размерности, предположительно аутигенные включения сульфидов. Наибольшей мощности горизонт достигает в колонке ONG-7(14), где не удалось достичь его нижней границы. Вскрытая мощность составляет более 1,0 м.

*Лимногляциальные отложения оstashковского возраста (верхняя пачка) (lgIIIост<sub>2</sub>).* Горизонт представлен ленточными глинами с градиционной текстурой. В колонке ONG-5(9,20) представляется возможным выделить внутри горизонта 3 подгоризонта, верхний из которых представлен микроленточными глинами, средний выделяется по увеличению мощности циклов, а нижний подчеркивается цветом (бежеватый тон). В целом горизонт выделяется на станциях 1 и 5. Наибольшая мощность установлена в колонке ONG-5(9). Вскрытая мощность составляет более 1,0 м.

*Лимногляциальные отложения оstashковского возраста (нижняя пачка) (lgIIIост<sub>1</sub>).* Горизонт представлен серыми ленточными глинами с неправильной цветовой циклической слоистостью. Вероятно это дистальные глины. Горизонт представлен в колонках ONG-1(1) и ONG-5(9,20) (достичь нижней границы горизонта не удалось), наибольшей мощности достигает в колонке ONG-1(1). Вскрытая мощность составляет более 1,0 м.

Таким образом, уже на первом этапе наблюдений удалось составить литостратиграфическую схему, которую можно рассматривать как опорную для Петрозаводской губы. Проведенные стационарные лабораторные исследования позволят точно привязать выделенные горизонты к возрасту.

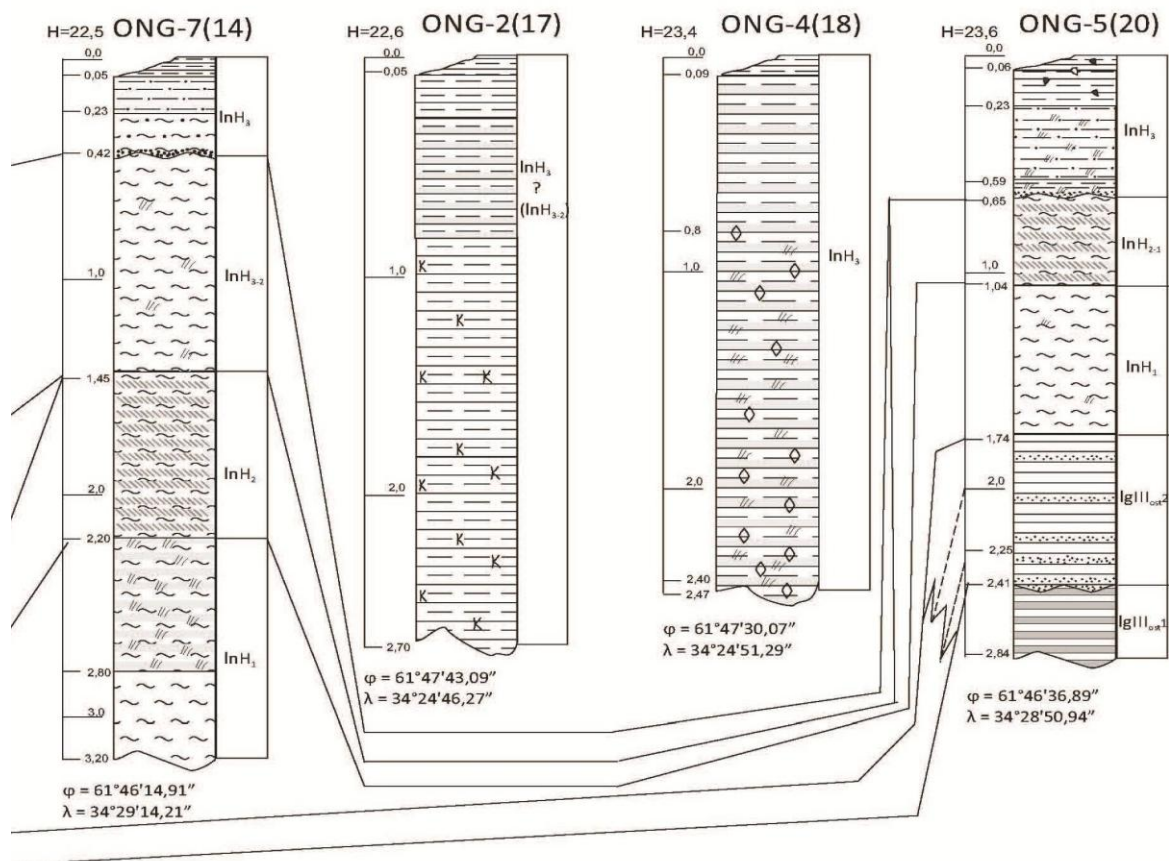


Рис.2. Схема корреляции колонок донных отложений.



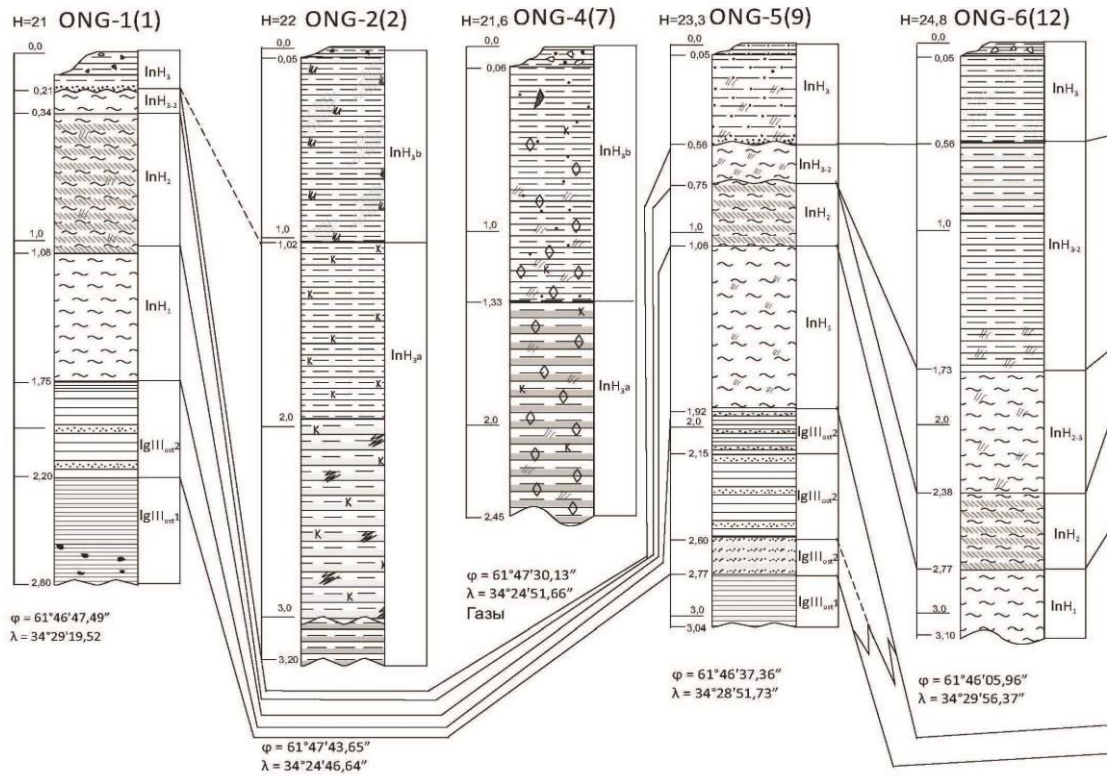


Рис.3 Схема корреляции колонок донных отложений. Продолжение.

### Условные знаки

	Глинистые алевриты		Ленточные глины
	Алевропелиты		Песчаные алевриты
	Слойки песка в основании ритма ленточных глин		Полосовидные скопления гидротроилита
	Галька (1), щебень и дресва (2) кристаллических пород		Диagenетическая полосчатость
	Стяжения гидротроилита		Цветовая слоистость в ленточных глинах
	Эрозионный контакт		Поры с газом

Рис. 4. Условные обозначения к схеме корреляции.

## NEW DATA FOR COMPLEX GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL STUDY OF UPPER- QUATERNARY SEDIMENTS PETROZAVODSK BAY LAKE ONEGA

Natalia Andreevna Kostromina,  
student, Institute of Earth Sciences  
St.Petersburg State University,  
E-mail: [kostromina132@gmail.com](mailto:kostromina132@gmail.com)

Aleksander Evmenevich Rybalko,  
Ph. D, professor, department of Geomorphology,  
Institute of Earth Sciences, St.Petersburg State University  
Andrey Stanislavovich Loktev  
Ph. D, chief geologist  
Arctic Marine Engineering Geological Expeditions

*Abstract:* This article adduced new data for quaternary geology of Petrozavodsk bay Lake Onega, which was obtained through field work. Article include litostratigraphic cores and correlation.

*Keywords:* lake sediments, quaternary sediments, Lake Onega

## БАЗА ДАННЫХ «PHYTOLADOGA»

Николай Владимирович Кочков,  
к.г.н., с.н.с. лаборатории гидрологии  
ИНОЗ РАН

E-mail: [kochkov\\_n@mail.ru](mailto:kochkov_n@mail.ru)

Елена Викторовна Протопопова,  
н.с. лаборатории гидробиологии  
ИНОЗ РАН

E-mail: [ephyto@mail.ru](mailto:ephyto@mail.ru)

*Аннотация:* База данных «PHYTOLADOGA» предназначена для хранения и дальнейшего накопления сведений по фитопланктону Ладожского озера. Данные охватывают период с 1991 по 2015 гг. Наблюдения за фитопланктоном Ладожского озера проводились на 123 станциях, расположенных в разных районах озера. В целом база данных состоит из 7 таблиц и насчитывает 89 полей, содержащих на настоящее время более 80 000 значений. База позволяет проследить за изменениями в сообществе фитопланктона на любом этапе наблюдений, что очень важно для Ладожского озера, которое является безальтернативным источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга.

*Ключевые слова:* система управления базами данных (СУБД), Ms Access реляционная база, фитопланктон, биомасса, виды, численность

База данных «PHYTOLADOGA» предназначена для хранения и дальнейшего накопления сведений по фитопланктону Ладожского озера. Первоначальное накопление материалов по фитопланктону происходило в приложении Excel, что оказалось не очень удобным в плане анализа данных, по существу, накопленный материал представляет собой архив данных с минимальными возможностями обработки и анализа полученных материалов. Невольно возник вопрос о создании Системы управления базами данных (СУБД). СУБД представляет собой совокупность программного обеспечения, с помощью которых можно создавать различные структуры, наполнять их и работать с ними. Многие из них являются специализированными языками программирования и, зная данный язык, возможно создание баз данных, наполняя их материалами и системами управления. К подобным языкам относятся Clipper, Paradox, FoxPro и другие [1].

Представляемая реляционная база использует приложение Microsoft Office Access 2007. В настоящее время Ms Access уверенно занимает лидирующее положение среди СУБД для приложений, работающих под управлением операционной системы Windows. С помощью Ms Access появляется возможность создания различных структур без какого-либо программирования (хотя использование элементов программирования не исключается). Дополнительным достоинством Ms Access является способность этой программы взаимодействовать с Ms Excel, Word и другими программами пакета Ms Office. Данные из разных приложений легко экспортируются и импортируются между собою. Немаловажным фактом является вопрос экономии материальных и технических средств при установке и работе пакета.

Применительно к Ms Access база данных есть совокупность таблиц, форм, запросов, отчетов, страниц, макросов и модулей [2]. По мнению авторов, наиболее необходимым для научного анализа является создание всевозможных запросов любой степени сложности с использованием макросов, позволяющих проводить различные вычисления, а также легкость и удобство составления отчетов любой сложности.

В базе данных «PHYTOLADOGA» представлены основные характеристики, определяющие распределение фитопланктона в озере. Данные охватывают период с 1991 по 2015 гг. Наблюдения за фитопланктоном Ладожского озера проводились на 123 станциях,

расположенных в разных районах озера. Станции различаются морфометрическими, термическими, гидрологическими и гидрохимическими условиями. Пробы на анализ фитопланктона отбирались в основные фазы вегетационного сезона из поверхностного слоя воды, а на отдельных станциях по различным горизонтам 5, 10, 25, 50 м и в придонном слое. Помимо данных о географическом расположении станций и гидрологических условиях в момент проведения наблюдений в базе представлены следующие значения, характеризующие распределение фитопланктона: общая численность и общая биомасса фитопланктона, содержание хлорофилла-а; первичная продукция, индексы Шеннона. Отдельно представлена структура фитопланктона: структура численности и структура биомассы, численность и биомасса наиболее часто встречающихся видов; структура фитопланктона по размеру клеток или колоний. В целом база данных состоит из 7 таблиц и насчитывает 89 полей, содержащих более 80 000 значений. База позволяет проследить за изменениями в сообществе фитопланктона на любом этапе наблюдений, что очень важно для Ладожского озера, которое является безальтернативным источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга.

На рис.1 представлена структурная схема (скриншот) базы данных. Представленные на схеме линии указывают на связи между различными таблицами.

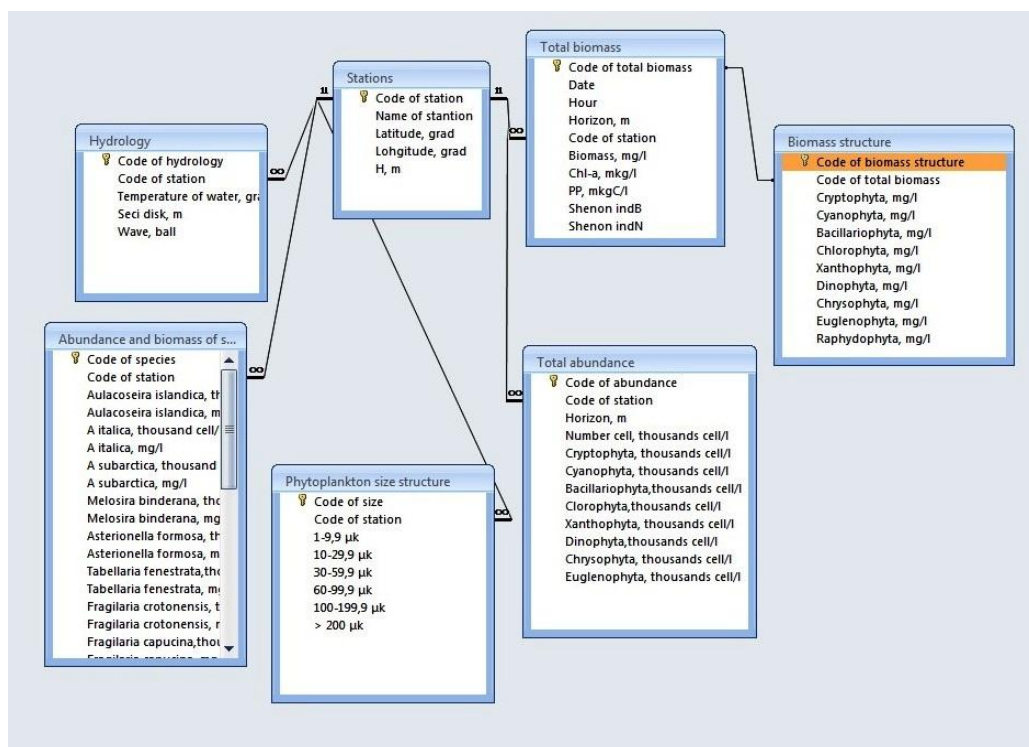


Рис.1. Схема базы данных «PHYTOLADOGA».

Для примера приведем вид нескольких таблиц

Таблица 1. Станции («Stations») содержит (рис. 2):

- 1) Код станции («Code of station»);
- 2) название станции («Name of stantion»);
- 3) широта станции в градусах («Latitude, grad»);
- 4) долгота станции в градусах («Lohgitude, grad»);
- 5) глубина станции в м («H, m»).

Code of stat	Name of sta	Latitude, gr	Longitude, H	H, m
1		60.160	32.350	6.4
2		60.283	32.362	12.4
3		60.320	32.527	8.8
4		60.367	32.297	12.5
5		60.333	32.130	8.8
6		60.378	31.893	13.8
7		60.458	31.820	24
8		60.495	31.983	18
9		60.448	32.223	30
10		60.485	32.383	28.1
11		60.613	32.475	57.7
12		60.633	32.642	12
13		60.553	32.708	6.3
14		60.160	32.350	152.2
15		60.715	32.570	19.5
16		60.573	31.917	34.6
17		60.505	31.592	34
18		60.388	31.492	20
19		60.225	31.635	14
20		60.160	32.350	12.4
21		60.395	31.092	22
22		60.323	30.942	15.7
23		60.432	31.255	13.8
24		60.547	31.345	38
25		60.622	31.675	41
26		60.653	31.843	54

Рис. 2. Фрагмент таблицы Станции («Stations»).

Таблица 2. Общая биомасса («Total biomass») содержит (рис. 3):

- 1) Код общей биомассы («Code of total biomass»);
- 2) дата измерения «Date»;
- 3) время измерения «Hour»;
- 4) глубина измерения («Horizon, m»);
- 5) код станции («Code of station»);
- 6) общая биомасса в мг/л («Biomass, mg/l»);
- 7) содержание хлорофилла-а в мкг/л («Ch-a, mkg/l»);
- 8) первичная продукция в мкгС/л («PP, mkgC/l»);
- 9) индекс Шеннона по биомассе («Shannon indB»);
- 10) индекс Шеннона по численности («Shannon indN»).

Code of totb	Date	Hour	Horizon, m	Code of stat	Biomass, mg	Ch-a, mkg/l	PP, mkgC/l	Shannon indB	Shannon indN
178	29.09.1993	7:12	0	1	3	9.61		4	4
179	10.06.1994	7:12	0	96	0	1.46		3	3
180	10.06.1994	7:12	0	23	1	1.98		4	3
181	10.06.1994	10:48	0	16	1	0.90		1	2
182	10.06.1994		5	16	1	1.01		1	3
183	10.06.1994		10	16	1	1.01		1	2
184	10.06.1994		30	16	1	0.77		1	3
185	10.06.1994	0:00	0	5	1	2.97		3	3
186	11.06.1994	10:48	0	1	1	9.74		4	4
187	11.06.1994	4:48	0	2	1	5.72		4	4
188	10.06.1994		5	2	1	4.79		3	4
189	10.06.1994		10	2	1	3.44		2	3
190	11.06.1994	0:00	0	10	2	1.42		1	2
191	11.06.1994	10:48	0	13	1	6.56		3	4
192	11.06.1994	10:48	0	15	1	3.24		2	3
193	12.06.1994	0:00	0	31	1	0.61		1	2
194	12.06.1994	7:12	0	32	1	0.60		1	2
195	12.06.1994		5	32	1	0.54		1	2
196	12.06.1994		10	32	1	0.60		1	2
197	12.06.1994		25	32	1	0.76		1	1
198	12.06.1994		60	32	1	0.48		1	2
199	12.06.1994	0:00	0	36	3	6.61		4	3
200	12.06.1994	9:36	0	43	0	0.43		1	2
201	12.06.1994	10:48	0	42	2	3.43		2	3
202	13.06.1994	2:24	0	47	0	0.17		3	2
203	13.06.1994	0:00	0	54	0	0.13		3	2
204	13.06.1994		5	54	0	0.13		3	3
205	13.06.1994		10	54	0	0.12		2	3
206	13.06.1994		25	54	0	0.12		2	2
207	13.06.1994		50	54	0	0.07		2	2
208	13.06.1994		100	54	0	0.07		2	2
209	13.06.1994		200	54	0	0.07		1	2
210	13.06.1994	0:00	0	59	0	0.30		1	2

Рисунок 3. Фрагмент таблицы Общая биомасса («Total biomass»).

Общая биомасса напрямую связана с таблицей 3.

Таблица 3. Структура биомассы («Biomass structure») содержит:

- 1) Код структуры биомассы («Code of biomass structure»);
- 2) код общей биомассы («Code of total biomass»);
- 3) содержание криптофитовых водорослей в общей биомассе в мг/л («Cryptophyta, mg/l»);
- 4) содержание синезеленых водорослей в общей биомассе в мг/л («Cyanophyta, mg/l»);
- 5) содержание диатомовых водорослей в общей биомассе в мг/л («Bacillariophyta, mg/l»);
- 6) содержание зеленых водорослей в общей биомассе в мг/л («Chlorophyta, mg/l»);
- 7) содержание желто-зеленых водорослей в общей биомассе в мг/л («Xanthophyta, mg/l»);
- 8) содержание динофитовых водорослей в общей биомассе в мг/л («Dinophyta, mg/l»);
- 9) содержание золотистых водорослей в общей биомассе в мг/л («Chrysophyta, mg/l»);
- 10) содержание эвгленовых водорослей в общей биомассе в мг/л



(«Euglenophyta, mg/l»); 11) содержание рафидофитовых водорослей в общей биомассе в мг/л («Raphidophyta, mg/l»).

Гидрологические данные, полученные во время взятия проб, представлены в таблице 4 («Hydrology»), которая содержит:

- 1) Код гидрологических данных («Code of hydrology»); 2) код станции («Code of station»); 3) температура воды в градусах Цельсия («Temperature of water, gradC»); 4) относительная прозрачность воды по диску Секки в м («Seci disk, m»); 5) волнение поверхности воды в баллах («Wave, ball»).

В таблице 5 представлена общая численность («Total abundance»):

- 1) Код численности («Code of abundance»); 2) код общей биомассы («Code of total biomass»); 3) общее число клеток в тысяча клеток на литр («Number cell, thousands cell/l»); 4) число клеток криптофитовых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Cryptophyta, thousands cell/l»); 5) число клеток синезеленых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Cyanophyta, thousands cell/l»); 6) число клеток диатомовых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Bacillariophyta, thousands cell/l»); 7) число клеток зеленых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Chlorophyta, thousands cell/l»); 8) число клеток желто-зеленых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Xanthophyta, mg/l»); 9) число клеток динофитовых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Dinophyta, thousands cell/l»); 10) число клеток золотистых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Chrysophyta, thousands cell/l»); 11) число клеток эвгленовых водорослей в общей численности в тысяча клеток на литр («Euglenophyta, thousands cell/l»).

Численность и биомасса некоторых массовых видов фитопланктона («Abundance and biomass of species») представлены в таблице 6:

- 1) Код видов («Code of species»); 2) код общей биомассы («Code of total biomass»); 3) численность вида *Aulacoseira islandica* в тысяча клеток на литр («Aulacoseira islandica, thousands cell/l»); 4) биомасса вида *Aulacoseira islandica* в мг/л («Aulacoseira islandica, mg/l»); 5) численность вида *A italica* в тысяча клеток на литр («A italica, thousands cell/l»); 6) биомасса вида *A italica* в мг/л («A italica, thousands cell/l»); 7) численность вида *A subarctica* в тысяча клеток на литр («A subarctica, thousands cell/l»); 8) биомасса вида *A subarctica* в мг/л («A subarctica, mg/l»); 9) численность вида *Melosira binderana* в тысяча клеток на литр («Melosira binderana, thousands cell/l»); 10) биомасса вида *Melosira binderana* в мг/л («Melosira binderana, mg/l»); 11) численность вида *Asterionella formosa* в тысяча клеток на литр («Asterionella formosa, thousands cell/l»); 12) биомасса вида *Asterionella formosa* в мг/л («Asterionella formosa, mg/l»); 13) численность вида *Tabellaria fenestrata* в тысяча клеток на литр («Tabellaria fenestrata, thousands cell/l»); 14) биомасса вида *Tabellaria fenestrata* в мг/л («Tabellaria fenestrata, mg/l»); 15) численность вида *Fragilaria crotonensis* в тысяча клеток на литр («Fragilaria crotonensis, thousands cell/l»); 16) биомасса вида *Fragilaria crotonensis* в мг/л («Fragilaria crotonensis, mg/l»); 17) численность вида *Fragilaria capucina* в тысяча клеток на литр («Fragilaria capucina, thousands cell/l»); 18) биомасса вида *Fragilaria capucina* в мг/л («Fragilaria capucina, mg/l»); 19) численность вида *Cryptomonas* sp в тысяча клеток на литр («Cryptomonas sp, thousands cell/l»); 20) биомасса вида *Cryptomonas* sp в мг/л («Cryptomonas sp, mg/l»); 21) численность вида *Rhodomonas lacustris* в тысяча клеток на литр («Rhodomonas lacustris, thousands cell/l»); 22) биомасса вида *Rhodomonas lacustris* в мг/л («Rhodomonas lacustris, mg/l»); 23) численность вида *Aphanizomenon flos-aq* в тысяча клеток на литр («Aphanizomenon flos-aq»); 24) биомасса вида *Aphanizomenon flos-aq* в мг/л («Aphanizomenon flos-aq, mg/l»); 25) численность вида *Anabaena* sp в тысяча клеток на литр («Anabaena sp, thousands cell/l»); 26) биомасса вида *Anabaena* sp в мг/л («Anabaena sp, mg/l»); 27) численность вида *Woronichinia naegeliana* в тысяча клеток на литр («Woronichinia naegeliana, thousands cell/l»); 28) биомасса вида *Woronichinia naegeliana* в мг/л («Woronichinia naegeliana, mg/l»); 29) численность вида *Microcystis grevillei* в тысяча клеток на литр («Microcystis grevillei, thousands cell/l»); 30) биомасса вида *Microcystis*

grevillei в мг/л («Microcystis grevillei, mg/l»); 31) численность вида Microcystis wesenbergii в тысяча клеток на литр («Microcystis wesenbergii, thousands cell/l»); 32) биомасса вида Microcystis wesenbergii в мг/л («Microcystis wesenbergii, mg/l»); 33) численность вида Dinobryon divergens в тысяча клеток на литр («Dinobryon divergens, thousands cell/l»); 34) биомасса вида Dinobryon divergens в мг/л («Dinobryon divergens, mg/l»); 35) численность вида Uroglena americana в тысяча клеток на литр («Uroglena americana, thousands cell/l»); 36) биомасса вида Uroglena americana в мг/л («Uroglena americana, mg/l»); 37) численность вида Tribonema affine в тысяча клеток на литр («Tribonema affine, thousands cell/l»); 38) биомасса вида Tribonema affine в мг/л («Tribonema affine, mg/l»); 39) биомасса вида Botryococcus braunii в мг/л («Botryococcus braunii, mg/l»).

Таблица 7. Размерная структура фитопланктона («Phytoplankton size structure») содержит:

- 1) Код («Code»); 2) код общей биомассы («Code of total biomass»); 3) размер фитопланктона от 1 до 9.9 микрон («1-9,9 μк»); 4) размер фитопланктона от 10 до 29.9 микрон («10-29,9 μк»); 5) размер фитопланктона от 30 до 59.9 микрон («30-59,9 μк»); 6) размер фитопланктона от 60 до 99.9 микрон («60-99,9 μк»); 7) размер фитопланктона от 100 до 199.9 микрон («100-199,9 μк»); 8) размер фитопланктона больше 200 микрон («> 200 μк»).

В заключении можно отметить: представленная база данных «PHYTOLADOGA» дает возможность эффективно работать с полученными материалами, наполнять ее вновь полученными данными, на более высоком уровне проводить анализ материалов.

В настоящее время база данных «PHYTOLADOGA» прошла регистрацию в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) и получила свидетельство [3].

#### Литература:

1. Когаловский М. Р. Энциклопедия технологий баз данных. М.: Финансы и статистика, 2002, 800 с.
2. Тимошок Т. В. Microsoft Access 2003. Краткое руководство. М.: Вильямс, 2005.
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «PHYTOLADOGA» №2016620977 от 20 июля 2016 г.

#### DATABASE «PHYTOLADOGA»

Nikolay Vladimirovich Kochkov  
Ph. D. senior researcher scientist  
of Hydrological laboratory,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [kochkov\\_n@mail.ru](mailto:kochkov_n@mail.ru)  
Elena Victorovna Protopopova  
Researcher scientist  
of laboratory Hydrobiology,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [ephyto@mail.ru](mailto:ephyto@mail.ru)

*Annotation:* Database «PHYTOLADOGA» is designed for storage and further accumulation of information on phytoplankton of Lake Ladoga. The data cover the period from 1991 to 2015. Observations of the phytoplankton of Lake Ladoga were carried out on 123 stations located in different parts of the lake. In general, the database consists of 7 tables and has 89 fields that contain at the moment more than 80 000 values. The database allows you to track changes in phytoplankton community at any stage of observation, which is very important for the Lake Ladoga, which is no alternative source of water supply in St. Petersburg.

*Keywords:* database management system (DBMS), Ms Access relational database, phytoplankton biomass, species population

**МЕТАБОЛИТНЫЙ СОСТАВ *POTAMOGETON PERFOLIATUS* L. И *PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) GRAY ИЗ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ  
В ЛАДОЖСКОМ И ОНЕЖСКОМ ОЗЕРАХ**

Юлия Викторовна Крылова,  
к.г.н., доцент по кафедре, доцент,  
Кафедра экологической безопасности и устойчивого развития регионов,  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,  
e-mail: juliakrylova@mail.ru;  
Евгений Александрович Курашов,  
д.б.н., профессор, заведующий лабораторией гидробиологии,  
ИНОЗ РАН  
e-mail: evgeny\_kurashov@mail.ru;  
Галина Геннадьевна Митрукова,  
к.б.н., младший научный сотрудник, ИНОЗ РАН  
e-mail: [galya-21@mail.ru](mailto:galya-21@mail.ru);  
Антон Сергеевич Сущенко,  
магистрант Кафедры экологической безопасности и  
устойчивого развития регионов,  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,  
e-mail: suschenko.a.s@ya.ru;  
Влада Вячеславовна Ходонович,  
бакалавр Кафедры экологической безопасности и  
устойчивого развития регионов,  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,  
e-mail: yarity94@mail.ru;  
Елизавета Ярославовна Явид,  
бакалавр Кафедры экологической безопасности и  
устойчивого развития регионов,  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,  
e-mail: sannysummer@bk.ru

*Аннотация:* Впервые проведено хромато-масс-спектрометрическое исследование компонентного состава низкомолекулярных органических соединений у рдеста пронзённолистного (*Potamogeton perfoliatus* L.) и горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) Gray из Ладожского и Онежского озера. Выявлены закономерности изменчивости метаболома растений в разнотипных озерных местообитаниях с различным уровнем антропогенного воздействия.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, Онежское озеро, *Potamogeton perfoliatus*, *Persicaria amphibia*, низкомолекулярные органические соединения, хромато-масс-спектрометрия, антропогенный фактор

### **Введение**

Рдест пронзённолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.) и горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) Gray, синоним *Polygonum amphibium*) широко распространены в Ладожском и Онежском озерах, часто являются доминирующими видами в растительных ассоциациях, выполняя структурообразующую роль [1, 2].

Вторичные метаболиты водных растений являются одним из важнейших факторов формирования гидробиоценозов в литоральной зоне озера [3], что определяет необходимость исследования закономерностей их синтеза макрофитами в различных экологических условиях. К настоящему времени закономерности продуцирования низкомолекулярных органических



соединений (НОС) изучены крайне недостаточно. В частности, практически нет никакой информации о том, как меняется метаболом водных макрофитов в местообитаниях, подверженных различной степени воздействия антропогенного фактора.

Сведения о полном компонентном составе НОС рдеста пронзённолистного и горца земноводного в литературе отсутствуют. В связи с этим, целью настоящей работы было получить информацию о компонентном составе НОС, рассмотреть изменчивость метаболома данных растений в разнотипных озерных местообитаниях и выявить особенности синтеза НОС в биотопах, подверженных антропогенному воздействию.

#### **Материал и методы исследования**

Образцы *P. perfoliatus* были отобраны в разнотипных местообитаниях литоральной зоны двух озер, находящиеся в Республике Карелия и Ленинградской области – Ладожском (конец июля-начало августа 2014 г.) и Онежском (конец июня – начало июля 2015 г.) (табл. 1). Образцы *P. amphibia* были отобраны только в Ладожском озере (конец июля-начало августа 2014 г.) (табл. 1). Характеристики водной среды в изученных местообитаниях, полученные при помощи многопараметрических зондов YSI 6600D и YSI 6600 V2-4 представлены в таблице 1.

Биотопы сбора растений различались по уровню антропогенного воздействия (табл.1). Из обследованных местообитаний к биотопам с отсутствием или слабым антропогенным воздействием могут быть отнесены точки отбора в Онежском озере, а также в Ладожском озере: в Свирской губе, в 3-ве Лехмолахти, в Волховской губе у дер. Вороново, в Якимварском 3-ве у пос. Сороло, а также у г. Питкяранта, где, несмотря на близкое расположение Питкярантского ЦБК, в проливе существует полностью восстановившийся биотоп, не испытывающий на протяжении более двух десятилетий прямого воздействия стоков ЦБК, которые в настоящее время сбрасываются в открытую Ладогу с другой стороны острова, на котором расположен ЦБК. К местообитаниям с высоким уровнем антропогенного пресса могут быть отнесены: участок в Щучьем заливе у дамбы, 3-в Импилахти, устье р.Волхов и участок у п. Ляскеля в Сортавальских щхерах. Последнее местообитание является восстанавливающимся после закрытия ЦБК и длительного отрицательного воздействия стоков Ляскельского бумажного завода и деревообрабатывающих производств, которые поступали сюда со стоками реки Янис и привели к почти полному уничтожению всей водной растительности кроме тростника, который находился в крайне угнетенном состоянии (наблюдения 2006 г.). В 2014 г во время отбора проб в данном местообитании уже развивались многочисленные водные растения, в т.ч. *P. amphibia*.

Для оценки узколокальных различий, связанных с воздействием антропогенного фактора исследовались образцы *P. perfoliatus* из Щучьего залива Ладожского озера. Залив является участком, определяемым как «зона экологического риска». Южная часть залива на протяжении 20 лет загрязнялась сточными водами Приозерского ЦБК, поступающими из озера Дроздово. Акватория Щучьего залива разделена дамбой, которая частично препятствовала распространению отходов ЦБК. В 1986 г. ЦБК был перепрофилирован. В настоящее время в залив в незначительных количествах через дамбу могут поступать стоки завода по выпуску древесно-волоконистых плит. В пределах данного залива в июне 2014 были отобраны 2 пробы *P. perfoliatus*: непосредственно у дамбы и примерно в 350 м ближе к выходу из залива за островом, где намного сильнее сказывается очищающее влияние открытой Ладоги.

Состав НОС растений и их концентрации выявляли в гексановых экстрактах на хромато-масс-спектрометрических комплексах TRACE DSQ II и TRACE ISQ (Thermo Electron Corporation). Более подробно методика сбора растительных образцов, пробоподготовки и проведения хромато-масс-спектрометрических исследований описаны в [4].

Таблица 1

Параметры исследованных озерных местообитаний: температура ( $T$ , °C); электропроводность ( $E$ , мС/см); минерализация ( $TDS$ , г/л); концентрация кислорода ( $DO1$ , %;  $DO2$ , мг/л);  $pH$ ; окислительно-восстановительный потенциал ( $Eh$ , мВ); концентрация аммонийного азота ( $NH_4$ , мг/л), концентрация нитратного азота ( $NO_3$ , мг/л), концентрация хлоридов – ( $Ch$ , мг/л), мутность ( $T+$ , NTU), численность фикоцианинсодержащих планктонных водорослей ( $BGA$ , кл/мл) и концентрация хлорофилла ( $Chl$ , мкг/л)

Местоположение/ координаты/ уровень антропогенного воздействия	T	E/ TDS	pH/ Eh	DO1/ DO2	NH <sub>4</sub> / NO <sub>3</sub>	Ch/ T+	Chl/ BGA
Свирская губа/ 60°31,449' ; 32°41,063' / отсутствует	22.3	0.082/ 0.056	7.40/ 135	97.4/ 8.47	0.14/ 2.80	0.43/ 1.9	3.9/ 1410
Волховская губа, дер.Вороново/ 60°16,353' ; 32°37,525' / слабое	26.9	0.113/ 0.071	7.52/ 119	105.0/ 8.36	0.13/ 2.27	0.57/ 12.9	12.5/ 3330
Волховская губа; устье р. Волхов/ 60°07,680' ; 32°19,417' / сильное	30.6	0.281/ 0.165	7.98/ 118	111.5/ 8.34	0.13/ 1.60	2.17/ 1.4	8.3/ 2430
з-в Импилахти/ 61°37,276' ; 31°10,404' / очень сильное	22.3	0.093/ 0.064	6.93/ 85	25.4/ 2.21	0.27/ 2.14	0.43/ 10.4	10.4/ 12440
Щучий з-в, у дамбы/ 61.081702°, 30.091958°/ сильное	13.5	0.133/ 0.111	7.69/ н	н/ н	0.31/ 3.23	4.82/ н	5,9/ 2010
Щучий залив, за островом/ 61.084203°, 30.093117°/ слабое, остаточное воздействие из грунта	10.6	0.082/ 0.074	7.68/ н	н/ н	0.30/ 4.49	3.90/ н	6.0/ 1110
З-в Лехмолахти/ 61.13951°, 29.930373°/ отсутствует	15.62	0.082/ 0.065	7.8/ 90	113.5/ 11.29	н/ н	н/ 2.5	3.7/ 890
*Яккимварский з-в, п.Сороло/ 61°29,159' ; 30°13,816' / слабое	23.1	0.094/ 0.063	7.70/ 105	107.2/ 9.16	0.20/ 4.41	0.67/ 3.8	4.0/ 2260
*Сортавальские шхеры, п.Ляскеля/ 61°42,415' ; 31°00,037' / восстановление после сильного загрязнения	24.3	0.072/ 0.047	7.56/ 74	109.4/ 9.14	0.19/ 3.00	0.42/ 1.0	3.2/ 1030
*У г. Пикьяранта/ 61°33,954' ; 31°28,040' / слабое	27.0	0.138/ 0.086	8.63/ 29	144.7/ 11.59	0.10/ 2.86	0.81/ 3.4	6.6/ 1230
Онежское озеро							
Пролив у дер. Суйсарь / 61°59.001' ; 34°33.330' / отсутствует	13,6	0,04/ 0,03	7,75/ 168	112,0/ 11,7	н/ н	н/ 0,0	2,9/ 430
Малая Лижемская губа / 62°22.129'; 34°31.637' / отсутствует	19,0	0,05/ 0,04	7,90/ 147	112,9/ 10,5	н/ н	н/ 0,0	3,5/ 170

Примечание: н – данные не получены; \* - места отбора проб *P. amphibia*

### Результаты и обсуждения

В эфирном масле *P. perfoliatus* из различных местообитаний выявлено от 54 до 134 НОС, что говорит о высокой вариабельности компонентного состава метаболитов в зависимости от условий произрастания растений. Об этом же свидетельствует несовпадение у растения групп наиболее обильных НОС в различных местообитаниях (табл. 2). Так, из семи обследованных местообитаний в Ладожском озере только в двух случаях было отмечено подобное совпадение: у растений из Щучьего залива в составе НОС наибольшее содержание имели эфиры, а в Свирской губе и устье Волхова преобладали альдегиды. В других биотопах наибольшим содержанием характеризовались другие группы НОС (табл. 2). Также и в Онежском озере, в одном случае у *P. perfoliatus* наиболее обильной группой были спирты, в другом случае – альдегиды (табл. 2).

Влияние конкретных условий произрастания (воздействие абиотических факторов и гидробиологического окружения) на состав НОС у *P. perfoliatus* хорошо иллюстрируются примером оценки метаболома у растений из двух биотопов в Щучьем заливе, отстоящих друг от

друга всего примерно на 350 м (рис. 1). Несмотря на близкое расположение 2-х точек произрастания рдеста и достаточно схожий состав НОС по основным функциональным группам (табл. 2), данные образцы *P. perfoliatus* имели существенные различия. Так, у рдеста, растущего у дамбы обнаружено 77 соединений, из которых 30 были специфическими, т.е. отсутствующие у рдеста, растущего за островом), у которого выявлено 54 НОС с 7 специфическими. Общими были 47 соединений. Кроме того, у рдеста произрастающего ближе к открытой Ладоге тремя наиболее обильными соединениями были гексадекановая кислота (13,82%), фитол (9,27%) и (Е)-гекс-2-еналь (8,81%), а у рдеста, растущего в биотопе у дамбы с более сильным антропогенным влиянием, мажорными компонентами были ((Е)-гекс-2-еналь (11,83%), диэтилгексилфталат (7,13%) и дибутилфталат (6,12%). Для рдеста, растущего в более чистом местообитании была характерна и более высокая суммарная концентрация НОС (85,6 против 46,4 мкг/г сух.в. у рдеста, растущего у дамбы) (табл. 3). Из опыта исследований наземных растений хорошо известно, что эфирное масло в большем количестве (и лучшего качества для медицинских целей) содержится в растениях, произрастающих в биотопах, неподверженных загрязнению, например, тяжелыми металлами [5]. По-видимому, эта же закономерность характерна и для водных растений.

Сходство метаболомов исследованных образцов растений из различных биотопов может быть оценено по коэффициенту сходства Сьёренсена-Чекановски ( $Q_s$ ) [6, 7]. Наиболее сходными оказались между собой образцы рдеста из Щучьего залива ( $Q_s = 0,72$ ). Также высоким сходством характеризовались образцы рдеста, произрастающего в Волховской и Свирской губах Ладожского озера ( $Q_s = 0,6$ ). Возможно, здесь сказались некоторые региональные особенности озерной среды, различающие в южной (влияние рек Волхова и Свири) и западной части Ладожского озера. Состав НОС рдеста из з-ва Лехмолахти отличался значительным своеобразием по сравнению с другими образцами ( $Q_s = 0,44-0,51$ ).

Таблица 2

Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) основных групп НОС в исследованных образцах *P. perfoliatus* из Ладожского и Онежского озер (Ладожское озеро: 1 – Щучий з-в у острова; 2 – Щучий з-в у дамбы; 3 – з. Импилахти; 4 – з. Лехмалахти; 5 – Свирская губа; 6 – Волховская губа (дер. Вороново); 7 – Волховская губа (устье р. Волхов); Онежское озеро: 8 – Малая Лижемская губа; 9 – дер. Суйсарь)

Группа соединений	Ладожское озеро							Онежское озеро	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Спирты	14.59	13.01	<b>24.18</b>	20.47	18.32	14.54	7.49	<b>30.60</b>	21.52
Альдегиды	16.49	21.48	18.53	5.47	<b>20.17</b>	10.79	<b>24.50</b>	7.88	<b>30.99</b>
Ароматические углеводороды	1.09	1.31	1.07	0.74	1.32	0.63	1.37	1.08	4.54
Карбоновые кислоты	15.21	2.19	4.14	<b>35.58</b>	5.82	15.49	0.24	26.43	5.62
Полифункциональные соединения	2.26	9.7	14.53	2.04	10.65	<b>16.96</b>	2.74	8.64	1.90
Эфиры	<b>18.79</b>	<b>21.69</b>	17.74	1.35	11.19	15.41	20.79	4.76	5.93
Углеводороды	15.39	16.19	7.07	27.33	15.43	12.78	21.35	15.34	11.50
Кетоны	12.42	13.3	10.63	3.27	15.42	13.37	21.51	5.27	17.16
Азотсодержащие	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64
Фенолы	2.46	0.59	1.37	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.16
Фосфорсодержащие	0.15	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
Серасодержащие	0.43	0.54	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Неидентифицированные	0.72	0.00	0.00	3.71	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00

Примечание: **полужирным курсивом** выделена наиболее обильная группа НОС.

Наибольшие различия отмечены при сравнении метаболомов рдеста из Ладожского и Онежского озер ( $Q_s = 0,4$ ). При этом составы НОС у рдеста из двух местообитаний в Онежском озере также сильно различались ( $Q_s = 0,4$ ). Необходимо исследование компонентного состава НОС у *P. perfoliatus* из большего числа местообитаний в этом озере. У горца земноводного наиболее сходны по составу НОС были образцы растений, произраставшие у г. Питкяранта и в Якимварском заливе ( $Q_s = 0,72$ ). Они имели незначительно, но более низкое сходство ( $Q_s = 0,60-0,70$ ) с составом НОС у *P. amphibia*, произраставшего у п.Ляскеля.

Таблица 3

Число НОС, 3 наиболее обильных компонента, их содержание (%), число карбоновых кислот ( $N_{ca}$ ) и суммарная концентрация НОС в сухом растении ( $C_{cp}$ , мкг/г сух.в.) у *P. perfoliatus* и *P. amphibia*, численность фикоцианинсодержащих планктонных водорослей (BGA, кл/мл) и концентрация хлорофилла (Chl, мкг/л) в различных местообитаниях в Ладожском и Онежском озерах

Местообитание	Число НОС (3 основных компонента (%))	$N_{ca}$	$C_{cp}$	BGA	Chl
<b><i>P. perfoliatus</i></b>					
Ладожское озеро					
Щучий залив (у дамбы)	77 ((E)-гекс-2-еналь (11,83%); диэтилгексилфталат (7,13%); дибутилфталат (6,12%))	2	46,40	2010	5,9
Щучий залив (у острова)	54 (гексадекановая кислота (13,82%); фитол (9,27%); (E)-гекс-2-еналь (8,81%))	2	85,60	1110	6,0
З-в Импилахти	62 (диэтилгексилфталат (14,78%); 8-(2,5,58А-тетраметил-1,4,4А,5,6,7,8,8А-октагидро-1-нафталенил)-6-метил-5-октен-2-ол (12,63%); (E)-гекс-2-еналь (7,06%))	2	51,30	12440	10,4
З-в Лехмолахти	110 (линоленовая кислота (18,20%); тетракозан (10,82%); гексадекановая кислота (10,14%))	11	245,2 0	890	3,7
Свирская губа	134 ((E)-гекс-2-еналь (10,14%); манол (6,04 %); гексадекан-1-ол (4,20%))	4	42,47	1410	3,9
Волховская губа (устье р. Волхов)	77 ((E)-гекс-2-еналь (8,11%); диизобутилфталат (6,37%); дибутилфталат (4,90%))	1	13,00	3330	12,5
Волховская губа (дер. Вороново)	93 (гексадекановая кислота (11,48%); прегнаноолон (7,93%); манол (3,23%))	2	19,00	2740	8,4
Онежское озеро					
Малая Лижемская губа	81 (фитол (17,36%); гексадекановая кислота (13,19%); трикозан (7,62%))	8	36,00	170	3,5
Дер. Суйсарь	85 ((E)-гекс-2-еналь (16,65%); фитол (9,64%); трикозан (4,44%))	5	4,00	430	2,9
<b><i>P. amphibia</i></b>					
г. Питкяранта	103 (гексадекановая кислота (41,08); линолевая кислота (9,10%); тетрадекановая кислота (4,28%))	5	132,5	1230	6,6
п. Ляскеля	73 (манол (28,23%); гексаналь (4,3%); октадеканаль (20,66%))	3	821,6	1030	3,2
п. Сороло	89 (гексадекановая кислота (39,03); тетрадекановая кислота (6,85 %); линолевая кислота (4,97%))	5	863,0	2260	4,0

Наибольшее число НОС зафиксировано у *P. perfoliatus* в Ладожском озере, произрастающего в ненарушенных местообитаниях (Свирская губа (134 НОС), з-в Лехмолахти (110 НОС)). Образцы *P. perfoliatus* из местообитаний с наибольшей антропогенной нагрузкой имели наименьшее число НОС (54-77 веществ) (табл. 3).

Образцы рдеста из Онежского озера содержали 81 и 85 соединений (табл. 3). Оба местообитания являются олиготрофными, что подтверждается показателями хлорофилла и концентрации цианобактерий и водорослей, содержащих пигмент фикоцианин (Cyanophyta, Cryptophyta и др.) (табл. 1). Для местообитания у дер. Суйсарь было зафиксировано самое низкое суммарное содержание НОС у *P. perfoliatus*, всего 4 мкг/г сух.в.. Возможно, это связано с сильной олиготрофностью данного местообитания, т.е. с очень неблагоприятными условиями произрастания рдеста, который не образовывал выраженных ассоциаций, а был представлен отдельными растениями на бедной песчаной литорали. Максимальное содержание НОС у рдеста пронзеннолистного зафиксировано в з-ве Лехмолахти Ладожского озера - 245,2 мкг/г сух.в. (табл. 3). Уровень синтеза/содержания вторичных низкомолекулярных метаболитов у горца земноводного существенно выше (до 863 мкг/г сух.в.), чем у рдеста (табл. 3).

Также как и у рдеста, значительные различия в составе НОС наблюдались у *P. amphibia* между ненарушенными водными местообитаниями и местообитаниями со значительным антропогенным прессом. Так, в образцах горца земноводного из местообитаний с благоприятными условиями озерной среды содержалось 89-103 НОС, тогда как у растений, произрастающих в биотопе, который в недавнем времени подвергался сильному загрязнению обнаружено только 73 соединения (табл. 3). При этом, в данном биотопе преобладающей группой были спирты, тогда как в местообитаниях с меньшей антропогенной нагрузкой преобладали карбоновые кислоты (табл. 3, 4).

При рассмотрении всего имеющегося материала по двум исследованным растениям отмечается закономерность, что в биотопах с меньшей антропогенной нагрузкой в растениях содержится больше карбоновых кислот (табл. 3). Так, наибольшее число карбоновых кислот (11) содержалось в образце рдеста из з-ва Лехмолахти. У рдеста, произрастающего в Онежском озере в эфирном масле, обнаружено 5 и 8 этих соединений (табл. 3). При этом, в биотопах с отсутствием или небольшой антропогенной нагрузкой карбоновые кислоты входили в состав трех наиболее обильных мажорных НОС. В биотопах с сильным влиянием антропогенного фактора в состав метаболома *P. perfoliatus* могут присутствовать только тетрадекановая и гексадекановая кислоты, причем они не входят в состав наиболее обильных НОС.

у *P. amphibia*, произрастающего в озерных биотопах с благоприятными условиями первая тройка мажорных компонентов была представлена исключительно карбоновыми кислотами (табл. 4), на долю которых приходилось 53-56% цельного эфирного масла. Преобладание спиртов в метаболоме горца земноводного, возможно, может являться индикаторным признаком антропогенного нарушения водной среды.

В отношении другой группы НОС, а именно фталатов, наблюдается обратная тенденция. Фталаты преобладали по содержанию и входили в состав 3-х наиболее обильных мажорных компонентов у *P. perfoliatus* в биотопах с наибольшей антропогенной нагрузкой. Однако, по-видимому, не стоит связывать этот факт с прямым воздействием какого-либо химического загрязнения или эвтрофирования на растения (хотя, полностью из-за слабой изученности вопроса это нельзя исключить). Вероятнее всего, это реакция растений на повышенное развитие в подобных биотопах цианобактерий и водорослей, что подтверждается данными таблицы 3. В биотопах с наименьшим развитием фитопланктона фталаты не входили в состав мажорных компонентов у *P. perfoliatus*. Известно, что фталаты участвуют в аллелопатических взаимодействиях и выполняют защитные функции у растений, в том числе у водных [8, 9, 10]. Вероятно, рдест увеличивает уровень синтеза фталатов при усилении конкурентного давления со стороны фитопланктона.

Таблица 4

Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) основных групп веществ у *P. amphibia* в разнотипных местообитаниях в Ладожском озере

Группа веществ	Питкяранта	Ляскеля	Сороло
Азотсодержащие вещества	0.18	0.22	0.03
Альдегиды	8.09	11.27	8.92
Ароматические углеводороды	1.68	2.32	1.41
Карбоновые кислоты	<b>56.34</b>	6.63	<b>53.76</b>
Кетоны	6.33	3.63	10.93
Неидентифицированные соединения	2.95	3.77	1.47
Полифункциональные соединения	1.74	1.35	1.58
Спирты	4.75	<b>52.96</b>	5.35
Углеводороды	8.63	8.72	5.10
Фенолы	0.49	0.63	0.30
Эфиры	8.83	8.50	11.15

Примечание: **полужирным курсивом** выделена наиболее обильная группа НОС.

### Заключение

Полученные результаты говорят о том, что формирование метаболома водных растений происходит в результате их активного взаимодействия с окружающей средой, при этом важно влияние как биотических, так и абиотических факторов, в том числе антропогенных, приводящих к разноплановым нарушениям водных биотопов. Учесть влияние многочисленных факторов и результат такого влияния применительно к конкретному облику метаболома макрофитов представляется весьма сложной научной задачей. Тем не менее, по-видимому, возможно выделить определенные закономерности, связанные с реакцией растений на антропогенный пресс. Так, для *P. perfoliatus*, преобладание фталатов среди мажорных компонентов, вероятно, может служить индикаторным признаком антропогенного нарушения водной среды, а наличие большого числа карбоновых кислот и их преобладание по содержанию (и у рдеста, и у горца) свидетельствовать об отсутствии или слабом антропогенном воздействии. В то же время, для *P. amphibia* признаком антропогенной нарушенности биотопа может служить большое по содержанию количество спиртов, прежде всего маноола.

### Литература:

1. Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. – Л.: Наука, 1985. – 200 с.
2. Литоральная зона Ладожского озера / под ред. Е. А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – 416 с.
3. Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems/ P. Fink // Marine and Freshwater Behaviour and Physiology. – 2007. – V. 40. – P. 155–168.
4. Курашов Е. А. Летучие низкомолекулярные метаболиты водных макрофитов, произрастающих на территории России, и их роль в гидроэкосистемах/ Е. А. Курашов., Ю. В. Крылова, Г. Г. Митрукова, А. М. Чернова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 4. – С. 573–591.
5. Опекунова М. Г. Изменение качества лекарственных растений *Thymus marschallianus* Willd. и *Salvia stepposa* Schost. под воздействием загрязнения тяжелыми металлами на Южном Урале/ М. Г. Опекунова, Ю. В. Крылова, Е. А. Курашов, А. Ю. Чихачева // Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества. – 2013. – № 2. – P. 97-112
6. Sorensen T. A. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, and its application to analyses of the vegetation on Danish commons/ T.A. Sorensen // Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter. – 1948. – V. 5. – P. 1-34.

7. Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz/ J. Czekanowski // *Anthropol. Anz.* – 1922. – V. 9. – P. 227-249.
8. Hegazy A. K. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta)/ A.K.Hegazy, W.M.Amer, A.A.Khedr // *Hydrobiologia.* – 2001. – V. 464. – P. 133-142.
9. Xuan T. D. Identification of Phytotoxic Substances from Early Growth of Barnyard Grass (*Echinochloa crusgalli*) Root Exudates/ T.D. Xuan, M. Chung, T.D. Khanh, S. Tawata // *J. Chem. Ecol.* – 2006. – V. 32. – P. 895–906.
10. Qiming X. Allelopathic activity of volatile substance from submerged macrophytes on *Microcystin aeruginosa*/ X. Qiming, C. Haidong, Z. Huixian, Y. Daqiang // *Acta Ecologica Sinica.* – 2006. – V. 26. – № 11. – P. 3549–3554.

**METABOLITE COMPOSITION OF *POTAMOGETON PERFOLIATUS* L. AND  
*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) GRAY FROM DIFFERENT TYPES OF LAKE HABITATS IN  
LADOGA AND ONEGA LAKES**

Julia V. Krylova,  
Ph.D., associate professor,  
Department of Ecological Security and Sustainable Development,  
St. Petersburg State University; E-mail: [juliakrylova@mail.ru](mailto:juliakrylova@mail.ru);

Evgeny A. Kurashov,  
Dr. Biol. Sci., Professor, Head of laboratory of Hydrobiology,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences;  
E-mail: [evgeny\\_kurashov@mail.ru](mailto:evgeny_kurashov@mail.ru);

Galina G. Mitrukova,  
Ph.D., junior researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences;  
E-mail: [galya-21@mail.ru](mailto:galya-21@mail.ru);

Anton S. Suschenko,  
Undergraduate of Department of Ecological Security  
and Sustainable Development, St. Petersburg State University;  
E-mail: [suschenko.a.s@ya.ru](mailto:suschenko.a.s@ya.ru);

Vlada V. Khodonovitch,  
Bachelor of Department of Ecological Security  
and Sustainable Development, St. Petersburg State University;  
E-mail: [yapity94@mail.ru](mailto:yapity94@mail.ru);

Elizaveta J. Javid,  
Bachelor of Department of Ecological Security  
and Sustainable Development, St. Petersburg State University;  
E-mail: [sannysummer@bk.ru](mailto:sannysummer@bk.ru)

*Abstract:* A gas chromatographic-mass spectrometric analysis of the component composition of low molecular weight volatile organic compounds in perfoliate pondweed (*Potamogeton perfoliatus* L.) and water smartweed (*Persicaria amphibia* (L.) Gray) from Ladoga and Onega Lakes was undertaken for the first time. Regularities of metabolom variability in different types of lake habitats with different level of anthropogenic impact are revealed.

*Keywords:* Lake Ladoga, Lake Onega., *Potamogeton perfoliatus*, *Persicaria amphibia*, low molecular weight volatile organic compounds, gas chromatographic-mass spectrometry, anthropogenic factor

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ГУБОК В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

- Нина Викторовна Кулакова  
к.б.н., старший научный сотрудник  
ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [kulakova@lin.irk.ru](mailto:kulakova@lin.irk.ru),
- Игорь Вениаминович Ханаев,  
старший научный сотрудник  
ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [igkhan@lin.irk.ru](mailto:igkhan@lin.irk.ru),
- Мария Владимировна Сакирко,  
к.г.н., научный сотрудник  
ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [sakira@lin.irk.ru](mailto:sakira@lin.irk.ru),
- Ренат Викторович Адельшин,  
к.б.н., старший научный сотрудник  
ФКУЗ Иркутский научно-исследовательский противочумный институт  
Сибири и Дальнего Востока Роспотребнадзора;  
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет»  
Научно-исследовательский институт биологии  
E-mail: [adelshin@gmail.com](mailto:adelshin@gmail.com),
- Сергей Ильич Феранчук,  
к.ф.-м.н, старший научный сотрудник  
ФГБУ науки Лимнологический институт Сибирского отделения  
Российской академии наук (ЛИН СО РАН);  
доцент кафедры биоинформатики ФГБОУ ВО  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»  
E-mail: [feranchuk@gmail.com](mailto:feranchuk@gmail.com),
- Ольга Олеговна Майкова,  
к.б.н., научный сотрудник  
ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [idboo8@mail.ru](mailto:idboo8@mail.ru),
- Татьяна Владимировна Бутина,  
к.б.н., с.н.с. ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [butina@lin.irk.ru](mailto:butina@lin.irk.ru),
- Сергей Иванович Беликов,  
д.б.н., проф., заведующий лабораторией  
ФГБУ науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН),  
E-mail: [sergeibelikov47@gmail.com](mailto:sergeibelikov47@gmail.com)

*Аннотация:* Массовая заболеваемость и гибель эндемичных губок оказывают существенное влияние на состояние бентосного сообщества литоральной зоны озера Байкал. Для исследования причин заболеваемости, нами проведен количественный анализ результатов 454 секвенирования



библиотеки гена 16S рРНК из больных и здоровых губок (*Lubomirskia baicalensis* и *Baikalospongia bacillifera*). В каждой группе было исследовано по 4 особи губок. Гидрохимические показатели воды оценивали с целью определения уровня содержания биогенных элементов и рН в толще и придонных слоях воды в местах сбора губок. Существенное изменение бактериального состава в больных губках было связано с увеличением представителей Cyanobacteria, Bacteroidetes, Alpha-, Beta-, Gammaproteobacteria и Verrucomicrobia в микробном сообществе губок. Анализ операционных таксономических единиц показал появление специфичных для больных губок таксонов, принадлежащих к 14 родам, отсутствующих в здоровых губках. Локальные повышения концентраций биогенных элементов, по сравнению с фоновым уровнем, были обнаружены с помощью гидрохимического анализа в придонных слоях воды в отдельных точках сбора. Дальнейшие исследования влияния стрессовых факторов на заболеваемость губок необходимы для выяснения причин их массовой гибели.

*Ключевые слова:* губки, заболеваемость, потенциальные патогены губок, биогенные элементы, Байкал

Губки эндемичного семейства Lubomirskiidae являются важным компонентом бентосных сообществ оз. Байкал. Максимальное разнообразие и биомасса губок наблюдаются в зоне фотосинтеза, на глубинах от 1,5 до 30 – 50 м [1]. Благодаря активной фильтрации, губки обеспечивают очистку и циркуляцию придонных слоев воды. С помощью ассоциированных микроорганизмов губки участвуют в фотосинтезе и продукции первичного вещества, образуют биологически активные вторичные метаболиты. Кроме того, губки являются важным звеном в круговороте биогенных элементов. Заселяя каменистые грунты, колонии губок создают уникальные условия для существования многих бентосных организмов.

В последние годы в литоральной зоне оз. Байкал наблюдаются существенные изменения в состоянии сообщества губок. Впервые заболевания губок были отмечены в Лиственничном заливе в 2011 г., рядом с активно развивающимся туристским центром Листвянка [2]. На сегодняшний день заболевшие губки обнаружены по всему периметру литоральной зоны. Вспышка заболевания вызвала массовую гибель губок различных видов [3]. Наиболее подверженными заболеванию оказались ветвистые губки *Lubomirskia baicalensis* (*L. baicalensis*), их ветки покрываются темными пятнами, обесцвечиваются и отмирают в течение 3-4 месяцев. В бактериальных матах, формирующихся в местах повреждения, активно развиваются цианобактерии. Заболевание корковых губок сопровождается изменением окраски, размягчением и некрозом с последующим отмиранием всей или части губки.

Ранее заболевания пресноводных губок не были описаны в научной литературе, однако, массовые явления заболеваемости и смертности отмечаются для кораллов и морских губок на протяжении последних десятилетий. В качестве причин, приводящих к заболеваемости, рассматриваются бактериальные и вирусные патогены, токсины, глобальное изменение климата и антропогенное загрязнение [4]. Несмотря на значительный вклад в изучение этой проблемы причины заболевания морских кораллов и губок до конца не ясны.

Для поиска потенциальных патогенов и анализа изменений, происходящих в сообществе ассоциированных с губкой организмов, мы провели секвенирование гена 16S рРНК двух видов байкальских губок – *L. baicalensis* и *Baikalospongia bacillifera* (*B. bacillifera*). Губки были идентифицированы на основе морфологических признаков по определителю Ефремовой [5]. Всего было проанализировано 4 здоровых и 4 больных губки. Образцы воды (50 мл), собранные рядом с губками были отфильтрованы через 0,22 мкм фильтры, взяты для экстракции ДНК и смешаны для постановки ПЦР с целью сравнительного анализа состава микроорганизмов губок и воды. Образцы здоровых и больных губок отбирали в северной (мыс. Турали), средней (о. Ольхон) и южной (зал. Лиственничный) котловинах Байкала. Гидрохимические показатели воды были оценены с целью мониторинга уровня содержания биогенных элементов и рН. Для 454 секвенирования геномную ДНК экстрагировали из 30 – 50 мг ткани с помощью реагента TRIzol LS согласно протоколу производителя (Invitrogen, Ambion, USA). Гипервариабельный регион V4–V6 гена 16S рРНК амплифицировали в ПЦР с универсальными бактериальными праймерами 518F and

1064R [6]. Амплификацию каждого образца проводили в трех повторах в 15 мкл реакционной смеси с помощью набора Tersus PCR kit (Евроген, Россия). Для каждого образца использовали MID – адаптеры, включенные в последовательность одного из праймеров. Пробоподготовку проводили по протоколу для приготовления библиотек ампликонов для GS-FLX Titanium 454 (Roche, 2014). Секвенирование проводили на приборе GS Junior System (Roche). Уровень гомологии более 97% был использован для кластеризации данных. Неклассифицированные последовательности были удалены из дальнейшего анализа.

В результате обработки и аннотирования нуклеотидных последовательностей в образцах было выявлено до 346 операционных таксономических единиц (OTU). Среднее количество OTU в здоровых и больных губках составило 296 и 313, соответственно. Таким образом, биоразнообразие в больных губках было выше по сравнению со здоровыми губками. Профили губок и воды существенно различались: в образцах воды доминантной группой были актинобактерии, тогда как во всех исследованных образцах губок количественно ( $51 \pm 14\%$ ) преобладали последовательности ДНК хлоропластов, среди которых доминировали представители Trebouxiophyceae. Различия в составе микроорганизмов в группах здоровых и больных губок были оценены в результате сравнительного анализа количественных показателей – процентных соотношений нуклеотидных последовательностей (ридов) в образцах. Статистически значимые изменения были обнаружены в 21 таксоне на уровне рода. Большинство изменений были связаны с увеличением представленности и появлением новых OTU. В исследованных видах губок наблюдалось увеличение численности следующих групп: Cytophagaceae (*Arcicella*), Chitinophagaceae (*Ferruginibacter*), Sphingobacteriaceae (*Pedobacter*); Cyanobacteria (Subsection III); Alphaproteobacteria Rhodobacteraceae (*Rhodobacter*, *Pseudorhodobacter*, uncultured group); Betaproteobacteria Comamonadaceae (*Acidovorax*, *Polaromonas*, uncultured group) и Oxalobacteraceae (*Undibacterium*); Gammaproteobacteria Xanthomonadaceae (*Arenimonas*); Verrucomicrobia Rubritaleacea (*Rubritalea*) и Verrucomicrobiacea (*Luteolibacter*). Таксоны, численное соотношение которых увеличилось только в больных *L. baicalensis*, включали: Bacteroidetes Cytophagaceae (*Flexibacter*), Betaproteobacteria Comamonadaceae (unclassified), Deltaproteobacteria Bdellovibrionaceae (*Bdellovibrio*), Gammaproteobacteria Pseudomonadaceae (*Pseudomonas*) и Verrucomicrobia (*Prsthecobacter*). Наибольшее (более чем в 5 раз) увеличение количества ридов обнаружено в: Cyanobacteria, Bacteroidetes, Alpha-, Beta- и Gammaproteobacteria, с доминированием представителей Cyanobacteria (Subsection III). Анализ показал, что один – два близкородственных OTU, принадлежащих к одному роду, доминировали в заболевших губках и отсутствовали в здоровых губках и воде.

Гидрохимические показатели воды были исследованы во всех точках сбора губок в толще воды. В нескольких точках (Лиственничный залив, бухта Ая) были получены результаты анализа придонных слоев воды. Нами обнаружено, что в придонных слоях воды в заливе, расположенном вблизи туристского центра Листвянка, показатели pH и биогенных элементов отличаются от фонового уровня. Наблюдалось уменьшение значений pH (до 7,2), повышение концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  (до двукратного). Также были обнаружены ранее не детектируемые ионы  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_2^-$ . Полученные результаты указывают на изменения, происходящие в литорали озера, что подтверждают признаки эвтрофикации, ранее отмеченные в заливах Байкала [7]. Кроме того, установленное изменение температурного режима, повышение температуры поверхности воды, уменьшение продолжительности ледового режима, могут являться стрессовыми факторами и способствовать развитию заболевания губок.

Таким образом, массовая гибель байкальских эндемичных губок, наблюдающаяся в последние годы, ведет к быстрому уменьшению численности и угрозе вымирания губок в литоральной зоне озера. Наиболее подвержены заболеванию ветвистые губки – *L. baicalensis*, однако заболевание зафиксировано для большинства видов байкальских губок. Пиросеквенирование библиотеки гена 16S рПНК было проведено для поиска возможных причин заболевания губок. Одновременно с секвенированием были оценены гидрохимические показатели воды в местах сбора губок для определения содержания биогенных элементов и pH. Полученные результаты указывают на существенные изменения в микробном сообществе больных губок, но

доминирующего этиологического агента заболевания не выявлено. Комплекс потенциальных бактериальных патогенов, обнаруженный в двух видах губок (*L. baicalensis* и *B. bacillifera*), включает представителей Cytophagaceae, Chitinophagaceae, Sphingobacteriaceae, Cyanobacteria (Subsection III), Rhodobacteraceae, Comamonadaceae, Oxalobacteraceae, Xanthomonadaceae и Verrucomicrobia. Количественные изменения в бактериальном составе и увеличение процентного соотношения родов из OTU, принадлежащих к 14 родам, являются характерными показателями больных губок. В бактериальных профилях больных губок доминируют гетеротрофные бактерии, участвующие в биодеградации и бактерии, родственные потенциальным патогенам, также ассоциированным с заболеваниями морских губок и кораллов. С помощью гидрохимического анализа установлено, что в придонных слоях воды, в отдельных точках сбора, приуроченных к местам активно развивающегося туризма, наблюдается повышение концентрации фосфора, азота и иона аммония по сравнению с фоновым уровнем. Предполагается, что стрессовые факторы, такие как повышение температуры воды, приток биогенных элементов, кислородное голодание, способствуют нарушению метаболизма, что ведет к заболеваемости и гибели губок при активном развитии оппортунистических микроорганизмов. Дальнейшие исследования влияния стрессовых факторов, а также других причин, таких как вирусная инфекция и токсины, необходимы для выяснения причин заболевания байкальских губок.

**Работа выполнена в рамках темы ФАНО 0345–2014–0002.**

#### Литература:

1. Кожов М. М. Очерки по байкаловедению / М. М. Кожов. – Иркутск, 1972. – 254 с.
2. Бормотов А.Е. Что случилось с байкальскими губками? / А. Е. Бормотов // Наука из первых рук. - 2011. - № 5 (41). - С. 20-23.
3. Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M. и др. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? / O. A. Timoshkin // J Great Lakes Res 2016, DOI:10.1016/j.jglr.2016.02.011.
4. Webster N. S. Sponge disease: a global threat? / N. S. Webster // Environ Microbiol. – 2007. – № 9(6). – С. 1363–1375.
5. Ефремова С. М. Губки (Porifera) // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Том 1. Озеро Байкал. Книга 1 // Н.: Наука, 2001а. – С. 130-137.
6. Newton R. J., Bootsma M. J., Morrison H. G. A microbial signature approach to identify fecal pollution in the waters off an urbanized coast of Lake Michigan/ R.J. Newton // Microb Ecol. – 2013. – № 65(4). С. 1011–1023.
7. Кравцова Л. С., Ижболдина Л. А., Ханаев И. В., Помазкина Г. В., Домышева В. М., Кравченко О. С., Грачев М. А. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия //Л.С. Кравцова //ДАН. – 2012. – № 447(2). С. 227-229.

## STUDY ON SPONGE MORBIDITY IN THE LITTORAL ZONE OF LAKE BAIKAL

Nina Victorovna Kulakova,  
PhD, Senior Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [kulakova@lin.irk.ru](mailto:kulakova@lin.irk.ru),

Igor Veniaminovich Khanaev,  
Senior Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [igkhan@lin.irk.ru](mailto:igkhan@lin.irk.ru),

Maria Vladimirovna Sakirko,  
Ph.D, Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [sakira@lin.irk.ru](mailto:sakira@lin.irk.ru),

Renat Victorovich Adelshin,  
PhD., Senior Researcher,  
Irkutsk Antiplague Research Institute of Siberia and Far East;  
Irkutsk State University, Institute of Biology  
E-mail: [adelshin@gmail.com](mailto:adelshin@gmail.com),

Sergey Ilyich Feranchuk,  
PhD, Senior Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; assistant  
professor of bioinformatics, Irkutsk National Technical University  
E-mail: [feranchuk@gmail.com](mailto:feranchuk@gmail.com),

Olga Olegovna Maikova,  
PhD, Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [jdboo8@mail.ru](mailto:jdboo8@mail.ru),

Tatyana Vladimirovna Butina,  
PhD, Senior Researcher,  
Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [butina@lin.irk.ru](mailto:butina@lin.irk.ru),

Sergey Ivanovich Belikov,  
D. Sc., Limnological Institute of Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: [sergeibelikov47@gmail.com](mailto:sergeibelikov47@gmail.com)

*Abstract:* Mass morbidity and mortality of endemic sponges have a significant impact on benthic community in the littoral zone of Lake Baikal. Quantitative analysis of 454 sequencing results based on 16S rRNA gene from healthy and diseased sponges (*Lubomirskia baicalensis* и *Baikalospongia bacillifera*) was used to study causes of sponge disease. There were four sponges in each studied group. Hydrochemical parameters were assessed to analyze concentration of nutrients and pH in water column and near bottom water at sampling sites. Significant changes in bacterial composition were associated with increasing of Cyanobacteria, Bacteroidetes, Alpha-, Beta-, Gammaproteobacteria and Verrucomicrobia in diseased sponges. Analysis of OTUs showed appearing of specific taxa from 14 genera that were absent in healthy sponges. Local increase concentration of nutrients in compare with background water was detected by hydrochemical analysis in near bottom water at several sampling sites. Further studies on impacts of stress factors are needed to determine the causes of sponge diseases.

*Key words:* sponges, morbidity, potential pathogens of sponges, nutrients, Lake Baikal

## РОЛЬ ВСЕЛЕНЦА *GMELINOIDES FASCIATUS* (STEBBING) В ПИТАНИИ РЫБ НА ЛИТОРАЛИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Александра Сергеевна Лобанова,  
аспирант 3-го курса эколого-биологического факультета, кафедры зоологии и экологии  
«Петрозаводский государственный университет»  
E-mail: [selin911@bk.ru](mailto:selin911@bk.ru)

*Аннотация:* Проведены исследования питания рыб, обитающих на литорали Онежского озера. Основу питания в период наблюдения составлял зоопланктон и представители зообентосного сообщества. Вселенец *Gmelinoides fasciatus* в некоторых пробах составлял более 50% по биомассе и численности.

*Ключевые слова:* Питание, рыбы, вселенец, байкальская амфипода, *Gmelinoides fasciatus*(Stebbing), Онежское озеро

Интенсивное распространение *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) по литорали Онежского озера привело к большому изменению кормовой базы озерных рыб. Из-за высокой численности и биомассы байкальской амфиподы в зообентосе один из массовых видов рыб – речной окунь *Perca fluviatilis* перешел к активному поеданию рачка. В тоже время сведений о том, что вселенец стал одним из основных пищевых объектов для местных видов рыб, обитающих в литоральной зоне Онежского озера, известно не много. На сегодня имеется только одна публикация [3], в которой представлены данные о питании окуня в Петрозаводской губе Онежского озера. Активное потребление инвазионного вида – байкальской амфиподы на этом участке Онежского озера позволяет сделать предположение о том, что и на других мелководных участках озера, где уже расселилась амфипода, аборигенные рыбы будут успешно питаться этим пищевым объектом. Т.е. остается неизвестной роль вселенца в питании рыб (Достигнута ли цель его интродукции?).

Материалы по питанию отлавливали с помощью разноячеистых сетей и удочек на глубине от метра до двух. Рыбу измеряли и взвешивали, все промеры фиксировались в виде таблиц. Желудки и кишечники извлекались и фиксировались 5% - ным формалином. Далее содержимое желудков и кишечников исследовалось под стереоскопом МБС – 9. Пищевые комки тщательно разбирались, определенные до семейств организмы по определителям М.В. Чертопруда и Е.С. Чертопруда [5], подсушивались на фильтровальной бумаге и взвешивались на торсионных весах с точностью до 0,1 мг.

Пробы на предмет исследований особенностей питания различных рыб были взяты в разных местах бассейна Онежского озера и в разное время года (летний и зимний сбор).

Для оценки роли байкальского бокоплава как кормового объекта рыб было исследовано питание окуня - наиболее массового вида в прибрежной зоне Онежского озера. Возрастной состав уловов был представлен особями трех возрастных групп (3+-5+), доминировали рыбы возрастом четырех и пяти лет (около 90%). Существенных различий в питании окуня разных возрастных групп не отмечено. Также в пробе присутствовали и другие виды рыб, такие как плотва, сиг и хариус. Но окунь брался в виде основного объекта исследований питания. Летом 2014 года в общем было выловлено 108 рыб, из которых 96 окуней, 9 – плотва, 2 хариуса и 1 сиг. Места улова были с приблизительно одинаковыми условиями, рассчитанными, исходя из образа жизни байкальского бокоплава (рачки предпочитают для обитания заросли тростника и каменисто-песчаный грунт). Поэтому, содержимое пищевых комков рыб, взятых с разных мест, было схожее. Чаще всего встречались зоопланктон и бентосные организмы, иногда мальки рыб. Байкальская амфипода была обнаружена в западной и южной частях озера.

В январе 2015 года было выловлено 67 образцов для изучения питания рыб. Улов был представлен тремя видами рыб: окунь, ерш и плотва. Для улова была выбрано западное побережье Онежского озера (рис. 1). Питание рыб зимой несколько отличается. В представленных

для исследования питания желудках и кишечниках была отмечена байкальская амфипода, в больших количествах, чем в пробах, собранных летом. Предполагается, это связано с неимением других, более привычных источников питания и с большой численностью *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) даже в зимний период времени.

В летний период 2015 года 68 рыб были пойманы в период с июня по сентябрь. Места отлова были разными. В исследовании было задействованы, помимо Онежского озера, другие водоемы, такие как Ладожское озеро, в котором байкальская амфипода была обнаружена еще раньше и небольшое озеро – Ангозеро. Исследуемый на предмет питания материал был представлен желудками окуня. Байкальская амфипода была обнаружена только в одном месте сбора (Бесов нос) (рис 1).

В зимний период 2016 года пробы рыб были собраны в начале января на мелководном участке с глубиной 1 – 1,5 метра в районе Кумса-Губа с помощью сетей. В этом районе было выловлено 18 окуней и 6 плотвы. Состав пищевого комка отловленных рыб не отличался разнообразием. Половина улова оказались с пустыми желудками или с переваренной пищей. Окунь обитает в прибрежной части водоемов и область его распространения совпадает с ареалом распространения *Gmelinoides fasciatus*. Исходя из этого, основу пищевых комков у большинства окуней составлял байкальский вселенец, который по сравнению с остальными бентосными организмами наиболее многочислен. В питании окуней на первом месте по частоте и биомассе была байкальская амфипода. Основываясь на результаты разбора предыдущих проб, в зимний период рачок-вселенец встречается в пищевых комках рыб чаще и в больших количествах, нежели в летний период. Разбор проб и дальнейший анализ и сравнение результатов с летними уловами показали, что окунь активно потребляет относительно новый инвазивный вид – байкальскую амфиподу, в особенности зимой, видимо, за неимением другого источника обильного корма и в соответствии места обитания окуня и *Gmelinoides fasciatus* [3]. Байкальская амфипода занимает небольшое место в рационе рыб: из 12 исследованных мест, только в 5 в питании рыб был обнаружен вселенец (рис 1).

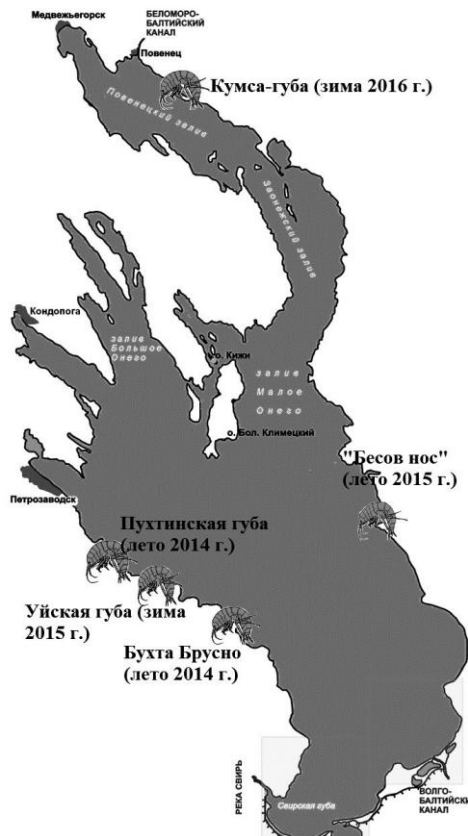


Рис. 1. Схематическое расположение точек отлова рыб, в питании которых была обнаружена байкальская амфипода

По данным Е.П. Горлачевой (2011) [1], в сезонном аспекте доля *G. fasciatus* в питании окуня оз. Арахлей сильно меняется. В марте он занимает до 90 % по массе пищевого комка. В мае окунь полностью переходит на питание чужеродным видом. В июне пищевой комок окуня был полностью представлен куколками хирономид, вылет которых происходил в этот период. В июле вид-вселенец уже составлял 50 % по массе, субдоминантом выступают личинки хирономид. В августе доминирующей пищей становятся дафнии (90 % по массе), а доля *G. fasciatus* падает до 10 %. Подобная ситуация, предположительно, наблюдалась нами в Онежском озере.

Интенсивное проникновение чужеродного вида *G. fasciatus* в Онежское озеро привело к значительным изменениям в составе пищи окуня. Данный вид стал доминирующим в составе пищевого спектра окуня в зимне-весенний период. В конце летнего периода его роль значительно падает, что связано с жизненным циклом развития самого рачка. На втором месте по встречаемости в пищевых комках отловленных окуней, были мальки рыб.

По данным В.И. Кияшко и др. (2010) [2], в Рыбинском водохранилище, при изучении питания бычка-цуцика *Proterophinus marmoratus* байкальская амфипода являлась вторым по значимости компонентом пищи, которая уступала личинкам хирономид по индексу обилия, но превосходил их по частоте встречаемости. При этом наблюдаются сезонные изменения в его потреблении. В июле эти два показателя для *Gmelinoides* были максимальными у мелких рыб и минимальными – у крупных. В августе и сентябре картина обратная. В октябре *Gmelinoides* становится редким и малозначимым объектом у большинства размерных групп рыб, за исключением самых крупных особей, у которых он остаётся доминантным, но с очень низким индексом обилия.

На основе всего вышеизложенного можно предположить, что чужеродный вид *G. fasciatus* успешно встраивается в естественные пищевые цепи, сложившиеся ранее за счет своей численности, неприхотливости к условиям обитания и ранней половозрелости.

Наши исследования показали, что в настоящее время инвазионный вид *G. fasciatus* не полностью входит в рацион питания окуня литорали – из 11 исследованных мест на 5 участках он не обнаружен в пищевых комках. В Петрозаводской губе в вершинной части губы, не далеко от места отлова окуней [3], нами не была обнаружена байкальская амфипода ни у одного из 27 окуней. В Ладожском озере отлов окуней на трех местах в северной части озера дал только отрицательный результат – ни в одном из 36 экз. не был обнаружен интересующий нас вид. Хотя, по данным Н.А Березиной с соавтором [6] в Ладожском озере инвазионным видом *G. fasciatus* питаются такие виды рыб, как налим, окунь и ерш.

Достаточно незначительное потребление *G. fasciatus* окунем на мелководье Онежского озера мы можем объяснить несколькими причинами. Во-первых, А.И. Сидоровой (2013) [4] было установлено, что не на всех типах литорали Онежского озера рачок *G. fasciatus* имеет высокие популяционные показатели. Максимальные величины характерны для самых мелководных зон с высоким развитием растительности в летние месяцы. Поэтому закономерно, что в местах, где численность и биомасса рачка высокая, например, в Кумса-губе Повенецкого залива окунь охотно питается инвазионным видом и, наоборот, на участке Уницкая губа, где *G. fasciatus* встречается редко, окунь питается другими организмами зообентоса.

Во-вторых, высокий процент встречаемости *G. fasciatus* у рыб обитающих только у самого уреза воды – у берега, где, как установила ранее А. И. Сидорова (2013) [4], самая высокая численность и биомасса данного вида. На сегодняшний день трудно сказать достигли ли популяционные показатели инвазионного вида *G. fasciatus*, такие как численность и биомасса, максимальных значений с момента освоения новых условий водоема-реципиента (Онежского озера), поэтому требуются дальнейшие исследования в этой области. Необходимо изучение спектров питания рыб в сезонном аспекте, поскольку в течение сезона популяционные показатели вида-вселенца изменяются.

#### Литература:

1. Е.П. Горлачева Роль чужеродного вида *Gmelinoides fasciatus* в питании окуня *Fluviatilis linnaeus* озера Арахлей // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Естественные науки, 2011 С. 163.
2. В. И. Кияшко, Н. А. Халько, В. В. Халько Изменчивость спектров питания бычка-цуцика *Proterorhinus marmoratus* (PERCIFORMES, GOBIIDAE) – нового вида в рыбном водохранилище// Институт биологии внутренних вод РАН – ИБВВ, Борок Ярославской области, 2010 С. 824.
3. Н.В. Ильмаст, Я.А. Кучко Байкальский бокоплав (*Gmelinoides fasciatus*) как кормовой объект рыб литоральной зоны Онежского озера // Учреждение Российской академии наук Институт биологии Карельского научного центра РАН, 2012 С. 37
4. Сидорова А.И. Структурно-функциональные характеристики популяции байкальского вселенца *Gmelinoides fasciatus* (Crustacea: Amphipoda) на северной границе ареала (Онежское озеро)// Диссертация. 2013. С. 8-106.
5. М.В. Чертопруд, Е.С. Чертопруд Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России//2010.
6. Berezina N.A., Strelnikova A.P. The role of the introduced amphipod *Gmelinoides fasciatus* and native amphipods as fish food in two large-scale north-western Russian inland water bodies: Lake Ladoga and Rybinsk Reservoir // Appl. Ichthyol. 26 (Suppl.2). 2010. P. 1-7.

### **THE ROLE INVASIVE GMELINOIDES FASCIATUS (STEBBING) IN FISH FEED IN THE INTERIDAL ZONE OF ONEGA LAKE**

Lobanova Aleksandra Sergeevna  
graduate student of the Faculty of Ecology and Biology, department of Zoology and Ecology  
E-mail: [selin911@bk.ru](mailto:selin911@bk.ru)

*Abstract:* Investigations of nutrition fish found in the littoral zone of Onega Lake. The basis of the nutrition during the follow-up of zooplankton and zoobenthos. Invader *Gmelinoides fasciatus* in some samples was greater than 50% for biomass and abundance.

*Keywords:* nutrition, fish, invader, amphipod of the Baikal, *Gmelinoides fasciatus*(Stebbing), Onega lake



## ВНЕШНЯЯ НАГРУЗКА НА ЛАДОЖСКОЕ И ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРА И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ К АНТРОПОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Петр Александрович Лозовик  
д.х.н., зав. лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

ИВПС КарНЦ РАН

E-mail: [lozovik@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:lozovik@nwpi.krc.karelia.ru)

Наталья Владимировна Кулик

аспирант ИВПС КарНЦ РАН

E-mail: [nadiet11@rambler.ru](mailto:nadiet11@rambler.ru)

Альбина Васильевна Сабылина

ст.н.с. лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

ИВПС КарНЦ РАН

E-mail: [sabylina@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:sabylina@nwpi.krc.karelia.ru)

*Аннотация:* В статье рассмотрено поступление веществ в Ладожское и Онежское озера от различных источников формирования их химического состава воды. По химическому балансу озер вычислены их удерживающая способность и константы скорости трансформации веществ. По кинетическим параметрам проведена оценка ассимиляционной способности озер и установлены допустимые нагрузки на озеро  $P_{\text{общ}}$ ,  $N_{\text{орг}}$ , Si, Fe. Для Онежского озера такие оценки получены также для Mn, Zn, Al и Cu.

*Ключевые слова:* Ладожское и Онежское озера, природная и антропогенно допустимые нагрузки, удерживающая способность, константа скорости трансформации, ассимиляционная способность озер.

Ладожское и Онежское озера являются крупнейшими водоемами Европы и их состояние вызывает всеобщий интерес. Формирование химического состава воды озер происходит в результате поступления речных и сточных вод, атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озера, а также в результате протекания внутриводоемных процессов и стока с селитебных территорий и со свалок бытовых отходов. На основании многолетних гидрохимических данных по составу воды озер и различных источников формирования их режима [2,7,9] проведена оценка природной и антропогенной нагрузки на озера биогенными элементами (БЭ), аллохтонным органическим веществом (ОВ) и в его составе  $N_{\text{орг}}$ , Si, Fe и другими металлами, а также ассимиляционной способности озер к этим веществам. Для Ладожского озера такая оценка дана только с Карельской части его водосбора, а для Онежского - со всего бассейна. В Ладожское озеро с Карельской территории его бассейна поступает в год 669 т  $P_{\text{общ}}$ , 11436 т  $N_{\text{общ}}$  и 371752 т ОВ (табл.1). По ОВ вклад природного стока составляет 96%, по  $N_{\text{общ}}$  – 79%, а по  $P_{\text{общ}}$  всего 41%. В стоке последнего велика доля рассеянных источников загрязнения (55%) и незначительная – точечных. В сток от рассеянных источников включен антропогенный сток с сельскохозяйственных объектов, форелеводческих хозяйств, селитебных территорий и со свалок бытовых отходов. Для Ладожского озера характерен именно высокий сток фосфора с сельхозугодий (43%) и от форелеводческих хозяйств, расположенных на водоемах его бассейна и на акватории озера (12%).

Таблица 1

Поступление веществ с природным стоком, а также от рассеянных и точечных источников загрязнения в Ладожское и Онежское озера

Источник поступления	P <sub>общ</sub>		N <sub>общ</sub>		ОВ	
	т/год	% от общего	т/год	% от общего	т/год	% от общего
Ладожское озеро						
Природный сток	273	41	9009	79	268518	96
Точечные источники загрязнения	27,5	4,1	215	1,9	914	0,3
Рассеянные источники загрязнения	369	55	2212	19	10296	3,4
Антропогенный сток	396	59	2427	21	11210	3,7
Всего	669	100	11436	100	279728	100
Онежское озеро						
Природный сток	567	61	10491	70	557004	93
Точечные источники загрязнения	236	25	2673	18	34297	6
Рассеянные источники загрязнения	123	13	1826	12	4963	0,8
Антропогенный сток	359	39	4499	30	39260	7
Всего	926	100	14990	100	596264	100

Для Онежского озера имеет место несколько иная картина, чем для Ладожского. Прежде всего по всем компонентам доминирует природный сток (P<sub>общ</sub> – 61%, N<sub>общ</sub> – 70%, ОВ – 93%). В антропогенных источниках преобладает сток от точечных источников загрязнения (25%), а от рассеянных он меньше (13%). Связано это с тем, что в бассейне Онежского озера и на его побережье расположены крупные промцентры, а сельское хозяйство развито слабо. В бассейне Ладожского озера получило большее развитие сельское хозяйство, а на его побережье расположены небольшие промцентры.

Используя данные по химическому балансу озер, можно вычислить удерживающую их способность по отдельным элементам и установить кинетические параметры их трансформации. Удерживающую способность (R) оценивали по известному уравнению:

$$R = \frac{\bar{C}_{np} - \bar{C}_{оз}}{\bar{C}_{np}}, \text{ где } \bar{C}_{np}, \bar{C}_{оз} - \text{средневзвешенные концентрации вещества в приточных водах и в озере, соответственно.}$$

Под приточными водами понимается водный сток в озеро от всех источников (речные воды, атмосферные осадки, подземные воды, разгружающиеся в озеро, минуя гидрографическую сеть, сток с селитебных территорий и со свалок бытовых отходов). Кроме того учитывалось поступление веществ и от форелеводческих хозяйств. Средневзвешенную концентрацию в приточных водах оценивали по стоку из озер. Для этого общее поступление вещества делили на объем стока из озера. Это позволило учесть испарение с поверхности озер, которое приводит к изменению концентрации элементов в приточных водах при их нахождении в озерах. Константу скорости трансформации веществ в озерных системах (k) вычисляли по уравнению связи R с периодом водообмена озер по стоку (τ) [5]:

$$R = \frac{k\tau}{1 + k\tau e^{-1/\tau}}$$

Таблица 2

Удерживающая способность озер и константы скорости трансформации веществ в них

Компонент	Ладожское озеро		Онежское озеро	
	<i>R</i>	<i>k</i> , год <sup>-1</sup>	<i>R</i>	<i>k</i> , год <sup>-1</sup>
<i>P</i> <sub>общ</sub>	0,63	0,13	0,72	0,14
<i>N</i> <sub>орг</sub>	0,69	0,16	0,64	0,10
ОВ	0,70	0,17	0,71	0,14
Fe	0,75	0,21	0,91	0,41
Si	0,74	0,29	0,85	0,27

Наибольшая удерживающая способность отмечается для Fe и Si (0,74-0,91), и несколько меньшие значения характерны для ОВ и БЭ (0,63-0,72). Аналогично изменяются и константы скорости трансформации веществ: наибольшие их величины получены для Fe и Si (0,21-0,41 год<sup>-1</sup>), наименьшие для ОВ и БЭ (0,1-0,17 год<sup>-1</sup>). Время полупревращения ОВ и БЭ составляет 4,1- 6,9 года, а для Fe и Si 1,7- 3,3 года. Из последних данных видно, что трансформация веществ в озерах протекает очень медленно, но благодаря длительному периоду водообмена (Ладожское озеро - 11,7 лет, Онежское озеро - 15,6 лет) концентрации веществ в воде озер значительно уменьшаются. Для Онежского озера наряду с указанными выше веществами был выполнен расчет баланса Mn, Zn, Cu, Ni, Cd и Al и выявлены особенности их трансформации в озере (табл. 3). Основное поступление металлов связано с речным стоком (68-93%), для Cu, Zn и Cd велика доля атмосферных осадков (13-30%). Вклад антропогенных источников в поступление всех металлов невелик (менее 1% каждого в отдельности элемента). Также как и для выше рассмотренных элементов, отмечается существенная трансформация Mn, Zn, и Al, тогда как для Cu, Ni и Cd она незначительна, особенно по последним двум элементам (табл. 4). Связано это с тем, что содержание Cu, Ni и Cd в озерных и приточных водах достаточно низкое и внутриводоемные процессы мало отражаются на их концентрации. Для Cu установлено самое низкое значение константы (0,04 год<sup>-1</sup>) и самое высокое время полупревращения (17,3 года). По-видимому по химическому балансу Cu в озере не представляется возможным точно вычислить константу скорости ее трансформации. Логично было бы ожидать близкие значения *k* для Cu, Zn. В действительности получены разные значения. Что касается Ni и Cd то их концентрации в озере и в приточных водах одинаковые и по химическому балансу этих элементов вообще не удастся установить скорости их трансформации в озере.

Таблица 3

Химический баланс микроэлементов в Онежском озере (2007-2008гг)

Элемент		Речной сток	Атмосферные осадки	Подземные воды	Сточные воды	Селитящие территории	Свалки	Всего
<b>Mn</b>	Концентрация, мг/л	0,06	0,003	0,20	0,20	0,32	0,03	0,06*
	Поступление, т	1044	19	28	13	3	0,1	1107
	Доля поступления, %	93,4	1,8	2,7	1,3	0,3	0,5	100
<b>Zn</b>	Концентрация, мкг/л	10,1	4,7	36,0	29,7	7,4	15,0	11,3*
	Поступление, т	176	30	5	2	0,1	0,1	213
	Доля поступления, %	82,7	14,0	2,4	0,9	<0,1	<0,1	100

<b>Cu</b>	Концентрация, мкг/л	1,4	0,6	2,5	4,1	5,0	6,4	1,5*
	Поступление, т	24	4	0,4	0,3	0,1	0,03	29
	Доля поступления, %	84,1	13,4	1,2	0,9	0,2	0,1	100
<b>Al</b>	Концентрация, мкг/л	174	10	35	174	31	174	165*
	Поступление, т	3028	63	5	12	0,3	7	3109
	Доля поступления, %	97,4	2	0,2	0,4	<0,1	<0,1	100
<b>Cd</b>	Концентрация, мкг/л	0,02	0,03	0,06	0,08	0,12	0,13	0,03*
	Поступление, т	0,4	0,2	0,008	0,01	<0,01	<0,001	1
	Доля поступления, %	67,6	30,0	1,3	0,9	0,2	0,1	100

\*- Средневзвешенная концентрация в приточных водах

Кинетические параметры трансформации веществ в озере могут быть использованы для оценки ассимиляционной (самоочистительной) способности водных объектов. За ее величину принимается истинная скорость трансформации веществ в воде, определяемая как произведение концентрации на константу скорости трансформации:  $V=kC$ , а за величину ассимиляции вещества в водном объекте  $As$  - произведение скорости на объем воды [1].

Таблица 4

Удерживающая способность Онежского озера к металлам и кинетические параметры их трансформации

Параметр	Mn	Al	Zn	Cu
$\bar{C}_{оз}$ , мкг/л	10	37	2,3	0,9
$\bar{C}_{пр}$ , мкг/л	60	165	11,3	1,50
$R$	0,83	0,78	0,80	0,41
$k$ , год <sup>-1</sup>	0,24	0,19	0,21	0,04
$\tau_{1/2}$ , год <sup>-1</sup>	2,9	3,7	3,3	17,3

Для рек ассимиляция будет выражаться произведением скорости на среднегодовой сток реки в данном створе:  $As_{рек}=kC_pV_{сток}$ . Для озер необходимо учитывать ассимиляцию вещества непосредственно в озерной котловине:  $As_{оз}=kC_{оз}V_{оз}$ , и за ее пределами, рассчитываемую по стоку воды из озера:  $As_{сток}=kC_{оз}V_{сток}$ . Суммарная ассимиляция вещества в озерных системах будет равна  $As=kC_{оз}(V_{оз}+V_{сток})=kC_{оз}V_{сток}(\tau+1)$ . Последнее уравнение является общим и для озер и рек, только для последних  $\tau=0$  [4, 5]. Полученные расчетные данные для обоих озер представлены в табл. 5.

Таблица 5

Ассимиляционная способность и ассимиляция БЭ и Fe в озерах

Параметр	$P_{общ}$	$N_{орг}$	Si	Fe	OB
Ладожское озеро					
$V$ , мкг/л в год	2,25	54,4	80,0	21,0	1430
$As_{оз}$ , т/год	2048	49395	72640	19068	1298440
$As_{сток}$ , т/год	174	4226	4226	1631	111018
$As$ , т/год	2222	53621	76866	20699	14409596
Онежское озеро					
$V$ , мкг/л в год	1,16	19,5	78,0	28,6	84,0
$As_{оз}$ , т/год	375	5714	22854	8204	246120
$As_{сток}$ , т/год	94	367	1466	526	15792
$As$ , т/год	399	6081	24320	8730	26191

Ассимиляционная способность Онежского и Ладожского озер, т.е. скорость удаления веществ из их водной среды составляет для  $P_{\text{общ}}$  1,2-2,3,  $N_{\text{орг}}$  20-54, Si – 78-80, Fe – 21-29 мкг/л в год. Ассимиляция веществ оценена непосредственно для озер и в истоке из них. В связи со значительном периодом водообмена озер (12-16 лет) озерная ассимиляция намного больше, чем в истоке из озер. Для водоемов с большим  $\tau$ , какими являются Онежское и Ладожское озера, характерна значительная аккумуляция веществ в озерной котловине. Так, озерная ассимиляция БЭ и Fe в этих озерах составляет около 30-35% от их запаса в воде, а от их годового притока около 65%. Аналогичная картина, которая была выявлена для биогенных элементов, органического вещества и для металлов в Онежском озере (табл. 6). Наибольшая ассимиляционная способность наблюдается по Al, а наименьшая - по Cu.

Таблица 6

Ассимиляционная способность и ассимиляция металлов в Онежском озере

Параметр	Mn	Al	Zn	Cu
V, мкг/л в год	2,3	7,0	0,48	0,04
As <sub>оз.</sub> , т/год	703	2051	141	11,7
As <sub>сток</sub> , т/год	45	132	9	0,8
As, т/год	748	2183	150	12,5

Если принять за допустимую антропогенную нагрузку на водный объект его ассимиляцию в природном состоянии, то мы можем вычислить эту нагрузку и установить, таким образом, общую допустимую нагрузку на водоем. Учитывая поступление веществ в озеро от разных источников, следует отметить наиболее значимый антропогенный сток  $P_{\text{общ}}$  для обоих озер, тогда как для остальных компонентов антропогенная составляющая незначительна или вообще отсутствует. Так, в современный период концентрация  $P_{\text{общ}}$  в Онежском озере составляет 9 мкг/л, а в Ладожском озере она приближается к 12-15 мкг/л. В 80-е годы прошлого столетия содержание  $P_{\text{общ}}$  в Ладожском озере достигало 25 мкг/л [6]. Существенное уменьшение поступления  $P_{\text{общ}}$  связано с экономической ситуацией в регионе, сокращением сельскохозяйственного и промышленного производства. Для форм азота в обоих озерах отмечается сбалансированное их распределение и преобладание в воде озер нитратной и органической форм, что указывает на устойчивое состояние озер и отсутствие их загрязнения азотсодержащими веществами.

$$\text{Онежское озеро: } \frac{N_{\text{орг}}}{0,3} > \frac{N-\text{NO}_3}{0,2} \gg \frac{N-\text{NH}_4}{0,02} \gg \frac{N-\text{NO}_2}{<0,001} \text{ мг N/л;}$$

$$\text{Ладожское озеро: } \frac{N-\text{NO}_3}{0,25} \approx \frac{N_{\text{орг}}}{0,25} \gg \frac{N-\text{NH}_4}{0,03} \gg \frac{N-\text{NO}_2}{0,001} \text{ мг N/л}$$

Учитывая, что в бассейне Онежского и Ладожского озер и на их побережье нет значимых источников загрязнения металлами (антропогенная составляющая по металлам для Онежского озера менее 1%), можно считать, что наблюдаемые концентрации металлов в воде этих озер близки к природным фоновым характеристикам. Такой же вывод можно сделать по отношению к ОВ,  $N_{\text{орг}}$ , Si и Fe. Что касается  $P_{\text{общ}}$ , то его содержание в воде озер отличается от природного. По аналогии с другими большими озерами Карелии (Пяозеро, Топозеро, Сегозеро, Ковдозеро) примем в качестве фоновой для Онежского озера 6 мкг/л. Для Ладожского, согласно рекомендациям Расплетиной Г.Ф. [6] эта величина равна 10 мкг/л. В соответствии с принятыми фоновыми значениями можно установить допустимые нагрузки на Онежское и Ладожское озера БЭ, Si и Fe (табл. 7). А для Онежского озера еще и по Mn, Zn, Cu, и Al (табл.8).

Таблица 7

Допустимые нагрузки на Онежское и Ладожское озера БЭ, ОВ, Si, Fe, т/год

Вид нагрузки	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{орг}}$	Si	Fe
Ладожское озеро				
Природная	2098	43506	170920	50499
Допустимая антропогенная	1281	53622	154359	24839

Допустимая общая	3379	97128	325277	75338
Онежское озеро				
Природная	567	8180	37030	14026
Допустимая антропогенная	262	9042	24320	8730
Допустимая общая	829	17222	61350	22756

Согласно данным таблиц 1 и 7 для Онежского озера фосфорная нагрузка в современный период (926 т/год) несколько превысила допустимую, а для Ладожского речная фосфорная нагрузка в 2006-2010 гг. (2500 т/год по данным [8]) меньше допустимой (3379 т/год). В настоящее время в Ладожском озере в связи с уменьшением внешней фосфорной нагрузки на водоем отмечается снижение концентрации  $P_{общ}$  в его воде. Для Онежского озера характерно устойчивое содержание  $P_{общ}$  за последние годы. Что касается остальных компонентов ( $N_{орг}$ , Si, Fe, ОВ), то допустимая антропогенная нагрузка по ним для обоих озер одного порядка, что и природная и по этим веществам на фоне их современного антропогенного поступления у обоих озер имеется существенная возможность по их утилизации.

Таблица 8

*Допустимые нагрузки металлами на Онежское озеро, т/год*

Вид нагрузки	Mn	Al	Zn	Cu
Природная	1091	3096	3096	28
Допустимая антропогенная	748	2193	2193	13
Допустимая общая	1839	5279	5279	41
$C_{доп}^*$ , мкг/л	17	62	3,8	1,3
$C_{фон}^*$ , мкг/л	10	37	2,3	0,9
$C_{доп}^*/C_{фон}^*$	1,7	1,68	1,65	1,44

Согласно общей нагрузке и допустимой антропогенной с учетом удерживающей способности Онежского озера увеличение концентраций металлов в его воде произойдет несущественно (табл. 8), в среднем по всем шести элементам в 1,62 раза. Установленная концентрация будет соответствовать той же категории водоемов, к которой Онежское озеро относится в современный период. Повышение концентрации элементов в озере согласуется с другим принципом нормирования допустимой антропогенной нагрузки: увеличение концентрации вещества в озере не должно приводить к изменению геохимического класса вод и оно должно быть не более  $\sqrt{2,5}$  кратному, т.е. не более чем в 1,58 раз [3]. Наибольшие изменения будут характерны для Al (с 37 до 68 мкг/л), Zn (с 2,3 до 4,0 мкг/л) и Cu (с 0,9 до 1,6 мкг/л). Но они будут находиться на уровне региональных фоновых величин по этим металлам и загрязнение озера металлами будет незначительным.

Таким образом, на основании многолетних наблюдений удалось оценить поступление веществ в Онежское и Ладожское озера от различных источников формирования химического состава их воды. Применяв кинетическую модель трансформации веществ установлена ассимиляционная способность озер и на его основе осуществлено нормирование допустимой нагрузки на озера БЭ, ОВ, Si и Fe, а для Онежского озера еще и металлами (Mn, Zn, Cu, и Al). По большинству компонентов у озер имеется достаточный резерв для их утилизации. В тоже время по  $P_{общ}$  для Онежского озера несколько превышена современная нагрузка по сравнению с допустимой. В Ладожском озере в связи со снижением внешней фосфорной нагрузки на водоем отмечается уменьшение концентрации  $P_{общ}$  в его воде.

#### Литература:

1. Лозовик П.А Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты с экологических и геохимических позиций // Научное обеспечение реализации "Водной стратегии российской федерации на период до 2020 года". – Петрозаводск. – 2015. – С. 446-452.

2. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. – 2016. – №5. – С.35-52.

3. Лозовик П.А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. Хим. Наук. М.. – 2006. – 59с

4. Лозовик П.А. Оценка ассимиляционной способности к фосфорной и органической нагрузкам и нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты по кинетической и гидрогеохимической моделям // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. –2015, – С. 88-95.

5. Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. –2011. –№4, –С.21-28.

6. Расплетина Г.Ф. Режим биогенных элементов // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л. – 1982. – С. 79-101.

7. Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1998–2006 гг. / Под. ред. П. А. Лозовика. – Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. –2007. – 210 с.

8. Сусарева О.М., Петрова Т.Н. Многолетний мониторинг динамики содержания фосфора в Ладожском озере // Материалы V Всероссийского симпозиума Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Петрозаводск, Изд. КарНЦ РАН. –2012. – С. 62-66.

9. Сабылина А.В. Химический состав воды притоков // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. –2015, – С. 61-67.

## **EXTERNAL LOAD ON THE LADOGA AND ONEGO LAKES AND THEIR RESISTANCE TO HUMAN IMPACTS**

Petr Aleksandrovich Lozovik

Prof., head of the laboratory of hydrochemistry and hydrogeology

NWPI KRC RAS

E-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru

Natal'ja Vladimirovna Kulik

Graduate student NWPI KRC RAS

E-mail: nadiet11@rambler.ru

Al'bina Vasil'evna Sabylina

Senior researcher of the laboratory of hydrochemistry and hydrogeology

NWPI KRC RAS

E-mail: sabylina@nwpi.krc.karelia.ru

*Abstract:* The delivery of substances from various sources of water chemistry in Lake Ladoga and Lake Onego are discussed in the article. Retention capacity and rate's constant of substance transformation were calculated by the chemical balance of the lakes. Assessment of assimilative capacity of the lakes were calculated from the kinetic parameters. Permissible loads on the lake Ptot, Norg, Si, Fe were established. Such estimates are also obtained for Mn, Zn, Al and Cu in Lake Onego.

*Keywords:* Ladoga and Onego lakes, natural and anthropogenic permissible load, retention capacity, constant of rate transformation, assimilation capacity of the lakes



**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ФЕРМЕНТОВ  
АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ НА ТЕПЛОВЫЙ ШОК У АМФИПОД *Gmelinoides  
fasciatus* ИЗ ЛИТОРАЛИ ОЗ. БАЙКАЛ И ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА**

Юлия Андреевна Лубяга,  
аспирант, ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный университет»  
E-mail: [yuliya.a.lubyaga@gmail.com](mailto:yuliya.a.lubyaga@gmail.com)  
Мария Сергеевна Трифонова  
аспирант, ИНОЗ РАН  
E-mail: [mstrifonova@outlook.com](mailto:mstrifonova@outlook.com)  
Василина Алексеевна Емшанова  
м.н.с., НИИ биологии ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный университет»  
E-mail: [v.emshanova@gmail.com](mailto:v.emshanova@gmail.com)  
Антон Николаевич Гурков  
аспирант, ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный университет»  
E-mail: [a.n.gurkov@gmail.com](mailto:a.n.gurkov@gmail.com)  
Денис Викторович Аксёнов-Грибанов,  
к.б.н., с.н.с. НИИ биологии ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный университет»  
E-mail: [denis.axengri@gmail.com](mailto:denis.axengri@gmail.com)  
Максим Анатольевич Тимофеев  
д.б.н., директор НИИ биологии ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный университет»  
E-mail: [m.a.timofeyev@gmail.com](mailto:m.a.timofeyev@gmail.com)

*Аннотация:* Целью настоящего исследования являлось проведение сравнительной оценки активности ферментов антиоксидантной системы (пероксидазы, каталазы, глутатион S-трансферазы) у эндемичных байкальских амфипод вида *Gmelinoides fasciatus* (Stebb) обитателей литорали оз. Байкал и термального источника в условиях острого температурного шока. Показано, что экспозиция представителей *G. fasciatus* из разных ареалов при остром температурном стрессовом воздействии не вызывает достоверно значимого изменения активности трех ключевых ферментов АОС. При этом у популяции из термальных источников обнаружено повышение базового уровня активности глутатион S-трансферазы в контроле, что может быть обусловлено особенностями абиотических факторов термального источника.

*Ключевые слова:* амфиподы, стресс, Байкал, термальные источники, ферменты антиоксидантной защиты

Изменение температурного режима водоема приводит к смене ключевых параметров среды обитания, таких как газовый режим и растворимость веществ, в том числе и токсичных компонентов, поступающих в водоем с грунтовыми и сточными водами. Повышенная температура среды обитания может усилить негативное влияние различных компонентов на организмы, населяющие водные экосистемы. В связи с этим представляется актуальным изучение механизмов стресс-реакции водных организмов в условиях изменения температуры среды обитания. Экологические и эволюционные характеристики видов, в частности показатели терморезистентности и термопреференции, могут играть решающую роль в их способности противостоять различным стрессовым факторам и антропогенным нагрузкам [1-3].

Байкальский вид амфипод *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) представляет собой уникальный объект для исследований адаптивных способностей гидробионтов, так как



принадлежит к немногочисленной в Байкале группе эврибионтов, обладает высокой экологической пластичностью, что позволило ему выйти далеко за пределы своего естественного ареала (озера от эв- до олиготрофных, а также реки) [4-6].

Целью данного исследования являлась сравнительная оценка активности ферментов антиоксидантной системы в условиях острого температурного шока у амфипод *G. fasciatus* обитателей литорали оз. Байкал и термального источника.

В работе использовали представителей популяции термального источника Верхняя Заимка, располагающийся в пределах Байкальской рифтовой зоны [7]. Вода источника гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридная магниевое-кальциевое-натриевая, минерализована слабо, среда слабощелочная. Общее термальное поле протяженностью не менее 400–450 м, начинается с основного выхода (28,8 °С) и обширной топи с мелкими высачиваниями. Амфиподы в массе обитают в разливах мелких излияний, при температурах 25–21°С. Также *G. fasciatus* был отловлен в литорали оз. Байкал в районе п. Большие Коты (Южный Байкал). Сбор амфипод производился гидробиологическим сачком.

В ходе исследования проведены эксперименты по экспонированию рачков в условиях острого теплового шока при температуре 27 °С после трехдневной акклимации при температуре 6°С в аквариумах с аэрируемой байкальской водой. Перед началом эксперимента были зафиксированы контрольные образцы амфипод сразу после акклимации. Время эксперимента составило 24 ч. После экспериментов рачков фиксировали в жидком азоте и проводили дальнейшие биохимические анализы. Эксперименты проведены в 3 - 5 биологических параллелях.

Оценку изменения активности ферментов антиоксидантной системы (пероксидазы, каталазы, глутатион S – трансферазы) производили методами спектрофотометрического анализа, согласно методикам Drotar (1985), Aebi (1984) и Habig (1974) соответственно [8]. Измерения проводили на спектрофотометре Cary 50 (Varian, США) при  $\lambda=340$  нм для пероксидазы, при  $\lambda=240$  нм для каталазы и при  $\lambda=436$  нм для глутатион S- трансферазы. Биохимический анализ каждой пробы проведен в 3-х аналитических измерениях. Оценку достоверности проводили, используя двувыворочный u-критерий Манна-Уитни. Статистический анализ проводили с использованием программы R-Studio.

В результате проведенных исследований были обнаружены статистически достоверные различия в активности глутатион S-трансферазы у контрольных групп разных популяций *G. fasciatus*. Так, у *G. fasciatus* из термального источника активность глутатион S-трансферазы была выше ( $6,0 \pm 0,7$  нКат/мг белка), чем у представителей этого вида из литорали оз. Байкал ( $4,3 \pm 0,45$  нКат/мг белка). У обеих групп животных активность данного фермента оставалась в пределах контрольных значений на протяжении всего эксперимента.

Активность фермента пероксидазы в контрольных группах *G. fasciatus* имела идентичные значения, и составляла  $0,019 \pm 0,007$  нКат/мг белка. Изменения в активности фермента пероксидазы наблюдалась на 1ч, 3ч, 6ч, 12 ч экспозиции у обеих групп *G. fasciatus*. Так, пик наименьший активности данного фермента был отмечен у представителей популяции из термального источника при 3 ч экспозиции, и составил  $0,009 \pm 0,005$  нКат/мг белка, а у амфипод из литорали Байкала этот пик отмечали при 6 ч экспозиции и активность составила  $0,015 \pm 0,005$  нКат/мг белка. При достижении 24 ч экспозиции активность пероксидазы у обеих популяций *G. fasciatus* достигла наибольшего значения составив  $0,021 \pm 0,65$  нКат/мг белка.

Значения активности каталазы в контрольных группах *G. fasciatus* различались не значительно и составляли  $355,0 \pm 167,8$  нКат/мг белка у амфипод из термального источника, и  $385,0 \pm 74,7$  нКат/мг белка у особей из литорали Байкала. При экспозиции в условиях острого температурного шока наблюдались различия в активности данного фермента. Так, у *G. fasciatus* из о. Байкал активность каталазы была в пределах контрольных значений на протяжении всего эксперимента, тогда как у рачков из термальных источников прослеживалась тенденция к повышению активности данного фермента на 1ч, 6 ч и 24 ч экспозиции с последующей тенденцией к понижению его активности (до контрольных значений) на 3 ч и 12 ч экспозиции. Наивысший показатель активность каталазы был отмечен на 24 ч экспозиции у обеих популяций *G. fasciatus*, и составил  $785,0 \pm 47,6$  нКат/мг белка у особей популяции из термальных источников,

433 ± 89,9 нКат/мг белка у амфипод из литорали озера. Самая низкая активность данного фермента составила 373 ± 90,6 нКат/мг белка и наблюдалась у животных из термальных источников при 12 ч экспозиции.

Таким образом, у представителей *G. fasciatus* из разных ареалов, острое температурное воздействие не вызывает достоверно значимого изменения активности трех ключевых ферментов АОС, что подтверждает ранее полученные нами данные о устойчивости данного вида к высоким температурам. При этом у контрольных особей популяции из термальных источников обнаружено повышение базового уровня активности глутатион S-трансферазы в контроле, что может быть связано с особенностями абиотических факторов термального источника, таких как постоянная высокая температура (25–21°C) и низкое содержание кислорода.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 16-34-60060 мол\_а\_дк, 15-29-01003 офи\_м, гранта РНФ 14-14-00400, темы ГЗ 1354–2014/51, 6.742.2016/ДААД, 6.734.2016/ДААД.

#### Литература:

1. Evgen'ev M.B. (2007) Molecular mechanisms underlying thermal adaptation of xeric animals. *Journal of biosciences*. **32**, 489–499.
2. Hofmann A. A., Parsons P. (1991) Evolutionary genetics and environmental stress. – Oxford University Press., 575 pp.
3. Imshaeva A.G. (1999) Stressful environmental conditions and genetic variability in animal populations. *Genetics*. **35**, 421-431.
4. Базикалова А.Я. О росте некоторых амфипод из Байкала и Ангары // Труды Байкальской Лимнологической станции. – 1951. - Т. XIII. – С. 206 – 216.
5. Березина Н.А., Голубков С.М., Максимов А.А. Опыт использования нового биоиндикатора (*Gmelinoides fasciatus*) для оценки состояния донных местообитаний в Финском заливе // Вода: химия и экология. — 2016. — № 04. — с. 40-47
6. Березина Н. А. Межвидовые взаимодействия амфипод *Gammarus lacustris* и *Gmelinoides fasciatus* / Экология 2009.2: 91-95
7. Тахтеев В.В., Галимзянова А.В. Байкальские родники // Экология и жизнь. - 2009. - № 2 (87). - С. 37-42; № 3 (88). - С. 40-45.
8. Тимофеев М.А. Экологические и физиологические аспекты адаптации к абиотическим факторам среды эндемичных байкальских и палеарктических амфипод / Дис. ... доктора биол. наук. Томск, 2010. - 384.

**A COMPARATIVE STUDY OF ANTIOXIDANT ENZYMES ACTIVITY TO HEAT SHOCK  
IN AMPHIPODS *GMELINOIDES FASCIATUS* OF LITTORAL COMMUNITY OF LAKE  
BAIKAL AND THERMAL SPRINGS**

Iuliia Andreevna Lubiaga,  
Ph.D. student, Irkutsk State University  
E-mail: [yuliya.a.lubyaga@gmail.com](mailto:yuliya.a.lubyaga@gmail.com)

Maria Sergeevna Trifonova  
Ph.D. student, Institute of Limnology  
E-mail: [mstrifonova@outlook.com](mailto:mstrifonova@outlook.com)

Vasilina Alekseevna Emshanova  
junior researcher, Institute of Biology at  
Irkutsk State University  
E-mail: [v.emshanova@gmail.com](mailto:v.emshanova@gmail.com)

Anton Nikolaevich Gurkov  
Ph.D. student, Irkutsk State University  
E-mail: [a.n.gurkov@gmail.com](mailto:a.n.gurkov@gmail.com)

Denis Viktorovich Axenov-Gribanov,  
PhD, Institute of Biology at  
Irkutsk State University  
E-mail: [denis.axengri@gmail.com](mailto:denis.axengri@gmail.com)

Maxim A. Timofeev  
Dr.Sci., director of the Institute of Biology at  
Irkutsk State University  
E-mail: [m.a.timofeyev@gmail.com](mailto:m.a.timofeyev@gmail.com)

*Abstract:* The aim of the current study was to comparative assessment of the antioxidant enzymes activity (peroxidase, catalase, glutathione S-transferase) in endemic species *Gmelinoides fasciatus* (Stebb., 1899) inhabitants of the littoral of the lake Baikal and the thermal spring under short term thermal stress. It was shown, that under exposure to acute temperature stress on *G. fasciatus* from different areas does not cause changes in the activity of three key enzymes of the antioxidant system. It the population of the thermal springs found increased activity of glutathione S-transferase in the control. It's animals could be due to the peculiarities of abiotic factors of their habitat.

*Keywords:* Amphipods, stress, Baikal, thermal springs, antioxidant enzymes

## ДИАТОМОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ШХЕРНОГО РАЙОНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

*Светлой памяти Натальи Наумовны Давыдовой (1931-2014),  
заложившей основы и много лет посвятившей изучению субфоссильных  
диатомовых комплексов и оценке состояния Ладожского озера*

Анна Валерьевна Лудикова  
к.г.н., научный сотрудник  
ИНОЗ РАН  
E-mail: [ellerbeckia@yandex.ru](mailto:ellerbeckia@yandex.ru)

*Аннотация:* Работа продолжает ряд многолетних наблюдений за изменениями состава диатомовых комплексов в результате антропогенного воздействия донных осадках Ладожского озера. Исследование состава диатомовых комплексов шхерного района и соотношения основных экологических групп диатомовых водорослей позволило сделать вывод о некотором улучшении качества водной среды по сравнению с данными начала 1990-х гг. Изученные участки по-прежнему находятся в олиго-  $\beta$ -мезосапробной зоне загрязнения со сравнительно высоким трофическим статусом.

*Ключевые слова:* диатомовые комплексы, донные отложения, Ладожское озеро, оценка антропогенного воздействия

Диатомовые комплексы, аккумулирующиеся в поверхностном слое донных отложений, представляют интегрированную пространственно-временную характеристику современной диатомовой флоры водоема. Поскольку для большинства видов диатомовых водорослей установлены четкие экологические предпочтения и специфические требования к условиям среды, диатомовый анализ поверхностного слоя донных осадков является экономичным и эффективным методом оценки состояния водоемов и мониторинга его изменений [1].

Первые работы по оценке состояния экосистемы Ладожского озера с использованием данных о составе диатомовых комплексов поверхностного слоя донных осадков относятся к началу 1960-х гг. Тогда были впервые изучены диатомовые водоросли 120 проб наилка, выполнено районирование поверхностных отложений на основе особенностей состава диатомовых комплексов, выявлены наиболее характерные виды диатомей 4 основных районов озера (северного, центрального, восточного и южного) [2-4]. В дальнейшем были рассчитаны интегральные индексы сапробности, что позволило выделить распределение зон эвтрофирования [5,6]. Исследования состава диатомовых комплексов поверхностного слоя донных осадков Ладожских шхер (северный район), проводившиеся в 1983-1985 гг. и 1991-1994 гг., показали значительное загрязнение участков шхерного района (Сортавальские шхеры, Якимварский залив, залив у пос. Ляскеля и др.), характеризующихся слабым водообменом с открытой частью озера [6,7].

Настоящая работа представляет собой продолжение ряда наблюдений за изменениями состава диатомовых комплексов в донных осадках Ладожского озера в результате антропогенного воздействия. Ее целью стало исследование состава диатомовых комплексов шхерного района. Пробы наилка отбирались в конце октября – начале ноября 2004 г. в Якимварском заливе, в заливах у г. Сортавала, Питкяранта и пос. Ляскеля (рис. 1, табл. 1). Экологические группировки видов по местообитанию, отношению к рН среды, трофности и сапробности выделены на основе данных Н.Н. Давыдовой и Г. Ван Дама с соавторами [5,8]. Использована номенклатура диатомовых водорослей, приведенная в [9].

Таблица 1

Местоположение, координаты и глубина исследованных станций, содержание видов-доминантов (>10%) и субдоминантов (5–10%)

№ пробы (станции)	Место отбора	Глубина отбора, м	Координаты	Доминанты	Субдоминанты
J-1	Якимварский залив, бухта у пос. Лахденпохья	15	61° 31,120 30° 12,934	<i>Aulacoseira islandica</i>	<i>Asterionella formosa</i> , <i>Diatoma tenuis</i> , <i>A. subarctica</i> , <i>Stephanodiscus minutulus</i> , <i>Fragilaria pinnata</i>
J-3	>> центральная часть	43	61° 29,422 30° 15,616	<i>A. islandica</i>	<i>A. subarctica</i> , <i>D. tenuis</i> , <i>F. pinnata</i> , <i>S. minutulus</i> ,
S-2	северная часть пролива Маркатсимансалми, (к югу от г. Сортавала)	33	61° 38,789 30° 41,597	<i>Aulacoseira subarctica</i> , <i>A. islandica</i>	<i>S. minutulus</i> , <i>A. formosa</i> , <i>Aulacoseira ambigua</i> , <i>Cyclostephanos dubius</i>
L-1	у входа в залив Халинселькя	85	61° 35,811 31° 04,289	<i>A. islandica</i> , <i>A. subarctica</i>	<i>S. minutulus</i> , <i>C. dubius</i>
L-2	залив Хиденселькя (в р-не устья р. Янисйоки и пос. Ляскеля)	22	61° 42,233 31° 00,106	<i>A. islandica</i>	<i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Aulacoseira subarctica</i> , <i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i> , <i>S. minutulus</i>
P-1	залив у г. Питкяранта (к югу от о-ва Пусунсаари)	33	61° 32,782 31° 27,190	<i>A. islandica</i> , <i>A. subarctica</i>	—
P-2	Питкярантский залив (к северу от о-ва Пусунсаари)	13	61° 35,222 31° 25,638	<i>A. islandica</i>	<i>D. tenuis</i> , <i>S. minutulus</i> , <i>A. formosa</i>

В составе диатомовых комплексов исследованных проб обнаружено 204 вида и внутривидовых таксона диатомовых водорослей. В 6 пробах из 7 доминируют диатомеи планктона (58-81%, рис. 2а, б). Из них наиболее многочисленна *Aulacoseira islandica*, максимальное относительное содержание которой (36%) характерно для наиболее глубоководной станции L-1, расположенной у входа в залив Халинселькя и имеющей непосредственное сообщение с открытой частью северного района Ладоги. Лишь в северной части пролива Маркатсимансалми у г. Сортавала (S-2) *A. islandica* играет роль со-доминанта (10,3%), уступая по численности *Aulacoseira subarctica* (19%), – другой характерной для рассматриваемой выборки планктонной диатомее.

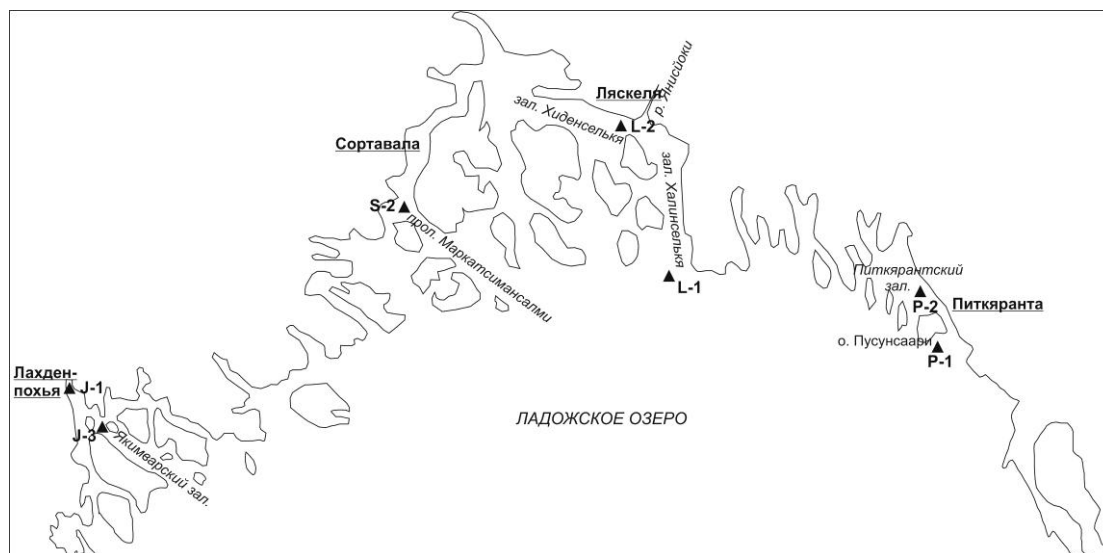


Рис. 1. Местонахождение исследованных станций.

Последняя также является со-доминантом в пробах, отобранных на станциях у входа в залив Халинселькя (L-1) и южнее г. Питкярента (P-1), и субдоминантом в образцах из Якимварского залива, (J-1, J-3) и в районе устья р. Янисйоки (залив Хиденселькя, L-2). Численности субдоминантов в 6 из 7 проб достигает планктонный *Stephanodiscus minutulus*, на отдельных станциях – *Asterionella formosa*, *Diatoms tenuis*, *Cyclostephanos dubius*, *Aulacoseira ambigua* (рис. 2а). Среди «обычных» (численностью 1-5%) планктонных видов, отмеченных в более чем 1 пробе, – *Fragilaria crotonensis* (до 2,6%), *Stephanodiscus hantzschii* (макс. 2,2%), *S. medius* (макс. 1,5%), *S. rotula* (до 1,8%), *Tabellaria fenestrata* (до 1,6%).

Бентосные диатомеи представлены преимущественно обрастателями родов *Achnanthes* и *Fragilaria*, из которых численности субдоминантов достигают *Fragilaria pinnata* (Якимварский залив), *F. construens* var. *venter* и *Achnanthes minutissima* (залив Хиденселькя). Эти же виды отмечены в других пробах с содержанием 1-5% (рис. 2а). Численность других характерных для рассматриваемой выборки обрастателей (*Cocconeis placentula*, *Cymbella silesiaca*, *Fragilaria brevistriata*, *F. capucina* et vars., *F. construens* var. *binodis*) в основном не превышает 2,5%. Наиболее характерные роды донных диатомей – *Navicula*, *Nitzschia* и *Amphora*, однако, относительное содержание их отдельных представителей, как правило, менее 1-1,5%. Суммарно бентосные диатомеи преобладают лишь в пробе L-2 (р-н устья р. Янисйоки), что вероятно, обусловлено их сносом с прибрежных мелководных участков юго-восточной части залива Хиденселькя. В целом состав доминант-субдоминантных комплексов и «обычных» видов в исследованных пробах характеризуется значительным видовым сходством (Табл. 1, рис. 2а).

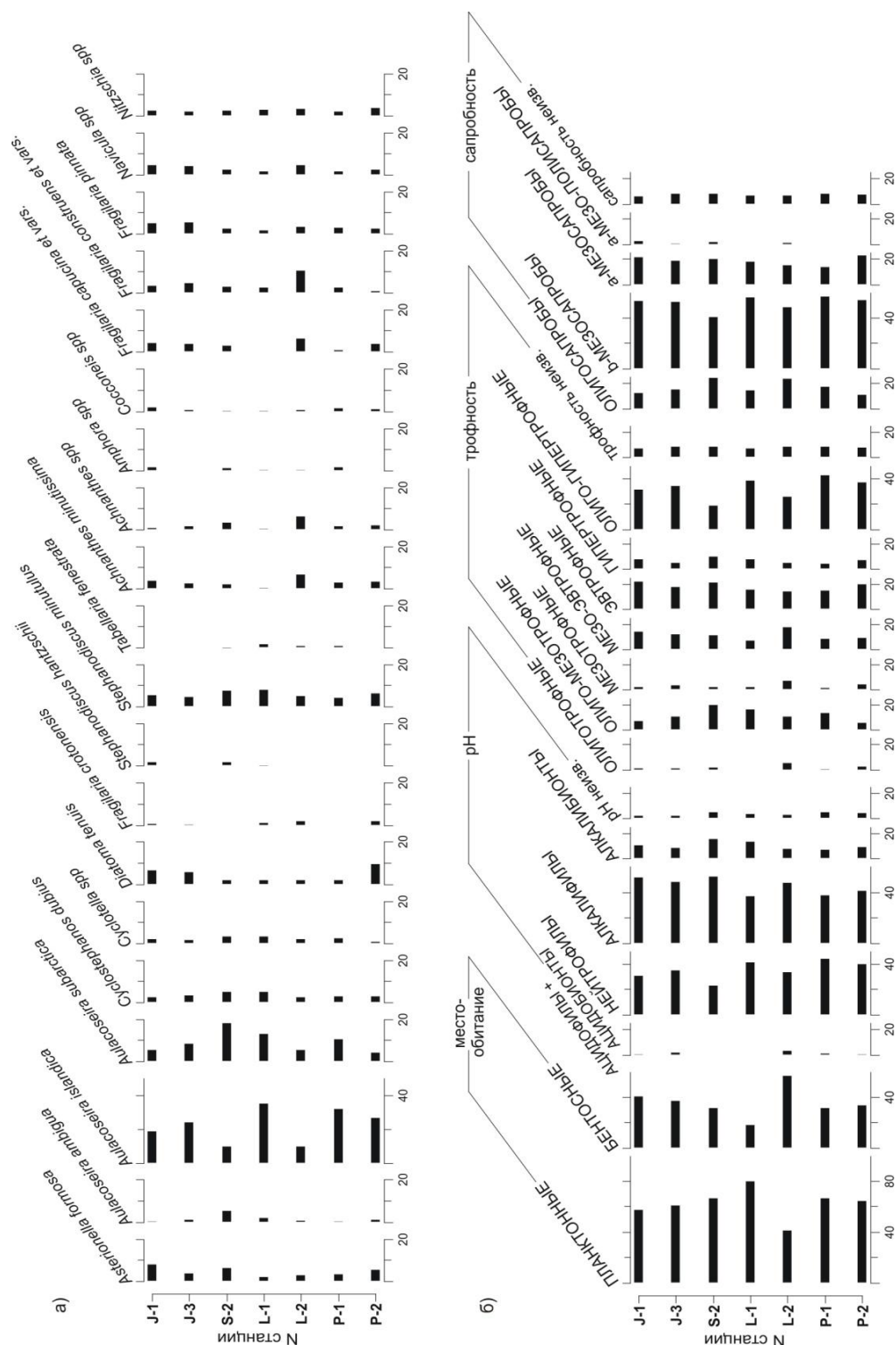


Рис. 2. Диаграммы: а) процентного содержания основных видов диатомовых водорослей, б) соотношения основных экологических групп.

По отношению к рН в составе диатомовых комплексов в Якимварском заливе (J-1, J-3), в шхерах у г. Сортавала (S-2) и в районе устья р. Янисйоки (L-2) преобладают алкалифилы (48-53%), предпочитающие слабощелочные условия (рис. 2б). Из них наиболее многочисленны планктонные *Asterionella formosa*, *Aulacoseira subarctica*, *D. tenuis* и обрастатели *F. construens* var. *venter* и *F. pinnata*. В остальных пробах нейтрофилы несколько превосходят их количественно или имеют сопоставимую численность. К наиболее характерным представителям этой группы относятся планктонная *Aulacoseira islandica* и обрастатели *Achnanthes minutissima* и *Fragilaria*

*capucina*. В диатомовых комплексах бухты у пос. Лахденпохья, у г. Сортавала и у входа в залив Халинселькя отмечается наиболее высокое содержание алкалибионтов (11-16%), развивающихся исключительно в щелочных условиях. В рассматриваемой выборке они в основном представлены видами *C. dubius*, *S. hantzschii* и *S. minutulus*. Суммарное содержание ацидофилов и ацидобионтов – обитателей слабокислых и кислых вод, – на всех станциях не превышает 5%. Незначительная численность представителей данных групп обусловлена нейтральными-слабощелочными значениями активной реакции среды Ладожского озера, лимитирующими их развитие. Очевидно, эти виды в основном попадают в Ладогу с водами ее притоков.

По отношению к трофности наиболее многочисленными (27-43%) во всех пробах, кроме S-2 являются «олиго-гипертрофные» виды, способные массово развиваться в широком диапазоне трофических условий (рис. 2б). Доминирование этой группы достигается главным образом за счет высокого содержания *A. islandica*, а также *A. minutissima*. В бухте у г. Сортавала, в свою очередь, отмечаются одни из наиболее высоких значений содержания «эвтрофных» (22%) и «гипертрофных» (10,6%) видов. Среди наиболее многочисленных представителей первой группы – *Aulacoseira ambigua*, *C. dubius* и *D. tenuis*, второй – *S. minutulus*, в меньшей степени *S. hantzschii*. Для указанной пробы характерна также самая высокая численность «олиго-мезотрофных» диатомей (21%), обусловленная присутствием в этой группе *A. subarctica*. Суммы «олиготрофных» и «мезотрофных» видов в изученных пробах составляют, соответственно, от 0,4% до 6% и от 1,8% до 7,8%. При этом численность отдельных представителей первой из указанных групп редко достигает статистически значимых значений, тогда как во второй с относительным содержанием >1% отмечены *F. capucina* и *F. crotonensis*. Общее содержание «мезо-эвтрофных» диатомей в рассматриваемой выборке варьирует от 7,7% (станция L-1 у входа в залив Халинселькя) до 18% (L-2, в районе устья р. Янисйоки). Из них с численностью >1% отмечены планктонная *A. formosa* и обрастатели *F. construens* var. *binodis* et var. *venter*. Сумма «эвтрофных» видов изменяется в пределах от 14,7% (L-2) до 22,6% (J-1, бухта у пос. Лахденпохья).

Преобладающей группой по отношению к сапробности являются β-мезосапробы (42-58%), включающие такие многочисленные виды, как *Achnanthes minutissima*, *Asterionella formosa*, *Aulacoseira islandica*, *A. ambigua*, *C. placentula*, *F. capucina*, *F. construens* var. *venter*, *F. crotonensis* и *F. pinnata*. Суммарное содержание олигосапробов не превышает 25% (рис. 2б), его наименьшие значения (11,5% и 13%) характерны для отложений бухты у пос. Лахденпохья (J-1) и Питкярантского залива (P-2), а наибольшие – для проб, взятых в бухте у г. Сортавала (S-2) и в районе устья р. Янисйоки (L-2). Основными представителями этой группы являются *A. subarctica* и *F. construens* var. *binodis*; относительная численность остальных видов, как правило, не превышает 1%. Численность α-мезосапробов – показателей значительного органического загрязнения составляет от 14,5% до 24%, при этом их максимальные значения отмечены в пробах из Якимварского залива у пос. Лахденпохья, бухты у г. Сортавала и Питкярантского залива. Наиболее характерные представители этой группы *C. dubius*, *D. tenuis* и *S. minutulus* – входят в состав диатомовых комплексов большинства изученных проб в качестве субдоминантов (5-10%) и «обычных» видов (1-5%). Содержание α-мезо-полисапробов и полисапробов – индикаторов высокого уровня органического загрязнения, на всех станциях не превышает 3,5% и 0,5%, соответственно.

Полученные данные отчасти согласуются с результатами предыдущих исследований. Так численное преобладание планктонных диатомей в наилке, установленное исследованиями 1960-х гг. [2-4], в целом характерно и для рассмотренной выборки. Наибольшую численность имеют *A. islandica*, доминирующая в составе диатомовых комплексов Ладожского озера, начиная с позднеледниковья [5], и *A. subarctica*, массово развивающаяся в планктоне северного района [4]. В то же время, некоторые виды, ранее отмечавшиеся в составе доминант-субдоминантного комплекса северной части Ладожского озера [4], в рассматриваемых пробах не достигают соответствующей численности, либо не отмечены вообще. Одной из причин, очевидно, являются изменения условий среды в результате антропогенного воздействия, вызвавшие, в частности, существенное сокращение численности прежде массово отмечаемых видов – ксеносапробной *Aulacoseira alpigena* и олигосапробной (олиго-β-мезосапробной) *Tabellaria fenestrata*.



Подтверждением тому являются результаты исследования колонки донных отложений из залива у г. Сортавала [5], выявившие антропогенно-обусловленные изменения в составе диатомовых комплексов, отразившиеся в резком уменьшении содержания указанных видов. В свою очередь отсутствие в исследованных пробах планктонных *Stephanodiscus astraea* и *Cyclotella comta* связано с позднейшими изменениями систематики и номенклатуры диатомей: в рассмотренной выборке им соответствуют *S. rotula* и *C. radiosa*. Однако, их численность здесь также значительно ниже, чем указана в источнике [4], что может быть связано как с изменениями качества водной среды, так и со спецификой условий формирования диатомовых комплексов на исследованных станциях.

Преобладание нейтрофилов и алкалифилов в составе диатомовых комплексов соответствует значениям рН ладожских вод. При этом более высокие значения содержания алкалифилов и/или алкалибионтов отмечаются, как правило, на тех же станциях, для которых характерна и более высокая численность «эвтрофных» и «гипертрофных» диатомей и  $\alpha$ -мезосапробов (J-1, S-2 и P-2), что обусловлено возрастанием значений активной реакции среды с повышением биологической продуктивности водоема. Это позволяет сделать вывод о сравнительно более высоком уровне антропогенного воздействия на экосистемы бухт у пос. Лахденпохья и г. Сортавала, а также Питкярантского залива, результатом которого является повышение трофности и сапробности. Формированию подобных условий, очевидно, способствовали удаленность указанных станций от открытой части Ладожского озера с одной стороны, и близость к источникам загрязнения, расположенным в прибрежных населенных пунктах, с другой. При этом изменения состава доминант-субдоминантных комплексов, отмечаемые на указанных станциях по сравнению с результатами предыдущих исследований [7, 10, 11], позволяют говорить о некотором улучшении экологической ситуации. Так, в пробах, отобранных вблизи рассматриваемых нами станций в начале 1990-х гг. [7], численности доминантов повсеместно достигали такие индикаторы эвтрофирования, как *A. formosa* и *D. tenuis*, в отдельных случаях превосходившие по численности массовую ладожскую диатомею *A. islandica*. По состоянию на 2004 г. на всех исследованных станциях эти виды перешли в статус субдоминантов либо «обычных». «Гипертрофный»  $\alpha$ -мезополисапроб *S. hantzschii* вышел из состава доминант-субдоминантного комплекса отложений бухты у г. Сортавала. Существенные изменения отмечены также в районе устья р. Янисйоки у пос. Ляскеля, где по данным исследований начала 1990-х гг. был зафиксирован «безжизненный» участок дна, граничащий с  $\alpha$ -мезосапробной зоной. Диатомеи доминант-субдоминантного комплекса на данном участке отсутствовали [7]. По состоянию на 2004 г. здесь отмечается преобладание  $\beta$ -мезосапробных видов, при этом отдельные виды обрастателей достигают численности субдоминантов, что вероятно указывает на некоторое улучшение качества водной среды в указанном районе. Характерное для всех исследованных станций преобладание диатомей – индикаторов умеренного загрязнения вод органическим веществом ( $\beta$ -мезосапробов) и сравнительно высокая доля олигосапробов косвенно указывает на то, что рассмотренные участки шхерного района по-прежнему находятся в олиго-  $\beta$ -мезосапробной зоне загрязнения. Это соответствует результатам количественной оценки сапробности данного района, выполненной в ходе исследований начала 1990-х гг. [6,7].

#### Литература:

1. Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal. In: Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Univer. of Joensuu // Karelian Institute. Working Papers. 2000, № 1, p. 68-75.
2. Давыдова Н. Н. К характеристике диатомовых водорослей донных отложений Ладожского озера // Ботанический журнал. 1961а, Т. XLVI, с. 722-726.
3. Давыдова Н. Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков ладожского озера по составу диатомового комплекса // Известия РГО. 1961б, Т. 93, № 3, с. 211-223.
4. Давыдова Н. Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера. В кн.: Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: «Наука», 1968. с. 131-174.

5. Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: «Наука», 1985. 244 с.
6. Давыдова Н. Н., Субетто Д. А., Кукконен М., Симола Х. Антропогенное воздействие на геосистему Ладожского озера по материалам многолетнего мониторинга донных отложений // Известия РГО. 1997, Т. 129, № 6, с. 48-58.
7. Davydova N., Simola H., Subetto D. Pushenko M., Vasiljeva E., Krylenkova N., Scherbak V. Bottom sediments and diatoms as indicators of the present state of the Lake Ladoga ecosystem 1994: In: Viljanen, M., Drabkova, V. & Filatov N. (eds.). Report on Lake Ladoga research in 1991–1993 // Publications of Karelian Institute. 1994, № 111, p. 144–156.
8. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // Netherlands Journal of Aquatic Ecology. 1994, Vol. 28, № 1, p. 117-133.
9. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1986–1991. Bd 2/1–4.
10. Davydova N.N., Kukkonen M., Simola H., Subetto D. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages // Boreal Environmental Research. 1999, Vol. 4, p. 269–275
11. Slepukhina T. D., Belyakova I. V., Chichikalyuk Yu. A., Davydova N. N., Frumin G. T., Kruglov E. M., Kurashov E. A., Rubleva E. V., Sergeeva L. V. Bottom sediments and biocoenoses of Northern Ladoga and their changes under human impact // Hydrobiologia. 1996, Vol. 322, p. 23-28.

#### **SURFACE-SEDIMENT DIATOM ASSEMBLAGES OF THE SKERRY PART OF LAKE LADOGA**

Anna Valerjevna Ludikova  
Candidate of Sciences, researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [ellerbeckia@yandex.ru](mailto:ellerbeckia@yandex.ru)

*Abstract:* The study is aimed to continue the long-term observations of the surface-sediment diatom assemblages composition changes resulted from the human impact. Investigation of the surface-sediment diatom assemblages and main ecological groups ratio in the skerry (northern) part of Lake Ladoga demonstrated some improvement of the aquatic environmental conditions compared to the studies performed in the early 1990-s. Still the study areas are considered oligo- to  $\beta$ -mesosaprobic with relatively high trophic state.

*Key words:* diatom assemblages, surface sediments, Lake Ladoga, human impact assessment

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА «ИЗОЛЯЦИОННЫХ БАССЕЙНОВ»  
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ  
ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

Анна Валерьевна Лудикова  
к.г.н., н.с. ИНОЗ РАН  
E-mail: [ellerbeckia@yandex.ru](mailto:ellerbeckia@yandex.ru)  
Денис Дмитриевич Кузнецов  
к.г.н., н.с. ИНОЗ РАН  
E-mail: [dd\\_kuznetsov@mail.ru](mailto:dd_kuznetsov@mail.ru)  
Дмитрий Александрович Субетто  
д.г.н., директор ИВПС КарНЦ РАН  
E-mail: [subetto@mail.ru](mailto:subetto@mail.ru)  
Татьяна Валентиновна Сапелко,  
к.г.н., с.н.с. ИНОЗ РАН  
E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Аннотация:* В статье обосновывается целесообразность использования метода «изоляционных бассейнов», традиционно применяемого при изучении изменений относительного уровня моря в поздне- и послеледниковое время под влиянием гляциоизостатических и неотектонических процессов, для реконструкции изменений уровня Ладожского озера и крупных пресноводных палеобассейнов (Балтийского ледникового озера, Анцилового озера), существовавших в его котловине. Данный подход основан на различии литологического состава отложений и диатомовых комплексов, накапливавшихся в котловинах малых озер на этапе вхождения в состав крупного бассейна и после изоляции от него. Изучение «лестницы» малых озер, ранее затапливавшихся водами крупных бассейнов, в пределах определенных ключевых участках Приладожья позволяет реконструировать не только общую динамику береговой линии Ладожского озера, но и изменения уровня в рамках каждого трансгрессивно-регрессивного этапа в отдельности.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, изменения уровня, изоляционные бассейны

В результате многолетних исследований палеогеографии Приладожья, были выделены 3 крупных трансгрессивно-регрессивных этапа, связанных с изменениями уровня Ладожского озера и палеобассейнов, существовавших в его котловине. На первом этапе, после завершения Валдайского оледенения, Ладожское озеро являлось восточным заливом Балтийского ледникового озера (БЛО), питаемого тальми водами отступавшего скандинавского ледника и занимавшего большую часть котловины современного Балтийского моря до ~11700-11600 кал.л.н., когда произошел спуск его вод в Мировой океан, а его уровень понизился за 1-2 года на 25 м [1]. Второй этап связан с возникновением в котловине Балтики Анцилового озера, во время трансгрессии которого в интервале 10700-10200 кал. л.н. его воды поступали в Ладогу через пролив в северной части Карельского перешейка. Регрессия Анцилового озера в Мировой океан привела к изоляции Ладожского озера от Балтики и понижению его уровня ниже современных отметок. Третья трансгрессивная фаза («ладожская трансгрессия») имела место в среднеголоценовое время и была обусловлена воздействием комплекса гляциоизостатических, гидрологических и климатических факторов [2]. Трансгрессия продолжалась ~2000 лет и завершилась образованием стока из Ладоги в Финский залив через р. Неву, в результате чего уровень Ладожского озера понизился до современных 5 м над у.м.

Геолого-геоморфологическими исследованиями были выявлены террасы и другие формы древнего берегового рельефа, связанные с указанными трансгрессивно-регрессивными этапами, и расположенные на абсолютных отметках от ~20 м до 50-60 м и более (стадия БЛО), от 5-6 м до 30

и более м (анциловая трансгрессия), и от 14-15 м до 20 и более м (ладожская трансгрессия). В результате опережающего гляциоизостатического поднятия северного Приладожья по сравнению с южным, высотные отметки береговых образований и отложений, рассматриваемых палеобассейнов возрастают в северном направлении. Однако реконструкции палеоуровней на основании полученных данных сопряжены с целым рядом сложностей, обусловленных тем, что: 1) древние береговые линии зачастую представлены фрагментарно, а участки их развития разобщены и значительно различаются по высотным отметкам в результате неравномерного гляциоизостатического поднятия; 2) многие древние береговые формы в значительной степени преобразованы воздействием различных экзогенных процессов, что не позволяет достоверно оценить уровень сформировавшего их палеобассейна; 3) отложения разновозрастных палеобассейнов нередко обладают литологическим сходством, что затрудняет установление их принадлежности к тому или иному трансгрессивно-регрессивному этапу.

Метод «изоляционных бассейнов» (англ. «isolation basins approach»), впервые примененный в Швеции около 100 лет назад [3], широко используется при изучении изменений относительного уровня моря в поздне-последледниковое время в результате неотектонических и гляциоизостатических движений суши. Под изоляционными бассейнами понимаются малые озера, котловины которых в прошлом затапливались морскими водами, а затем отделились от моря в ходе регрессии береговой линии. В колонках донных осадков таких водоемов отмечаются литологические горизонты, соответствующие морским, «переходным» и собственно озерным условиям осадконакопления [4], характеризующиеся определенным составом и микропалеонтологическими комплексами. Изменения соотношения представителей индикаторных групп микрофоссилий (в первую очередь, диатомовых водорослей), обусловленные изменениями солености в ходе изоляции от моря, позволяют достаточно надежно выделить стратиграфический уровень, соответствующий времени установления пресноводных условий. Изучение отложений изоляционных бассейнов, расположенных на разных высотных отметках в пределах территории с одинаковой скоростью неотектонических или гляциоизостатических движений, и датирование начала в них озерного этапа осадконакопления дает возможность установить хронологию перемещения береговой линии и построить кривую изменения относительного уровня моря для данного участка побережья в пределах рассматриваемого временного интервала.

Применение метода «изоляционных бассейнов» для изучения изменений уровня крупных пресноводных водоемов в результате вертикальных движений земной коры основано на том, что осадки, формировавшиеся на дне малых озер на этапе вхождения в состав крупного бассейна, во время и после изоляции от него, характеризуются различным литологическим, химическим и минеральным составом. На этапе трансгрессии крупного бассейна в составе диатомовых комплексов в малом водоеме присутствуют (и зачастую доминируют) так называемые «виды больших озер». Для водных объектов умеренных широт это преимущественно диатомеи, обитающие в олиготрофных, глубоководных и холодноводных условиях. Среди типичных бентосных представителей данной группы преобладают обитатели минерального субстрата. В результате изоляции в котловине малого водоема устанавливаются гидродинамические, гидрохимические, гидробиологические условия, отличающиеся от условий крупного бассейна. Представители «видов больших озер» исчезают из состава диатомовых комплексов, на смену им приходят так называемые «виды малых озер» (рис. 1), типичные для мелководных водоемов с органогенным осадконакоплением.

Данные изучения геологических скважин, обнажений и осадков малых озер Приладожья свидетельствуют о том, что отложения трех трансгрессивно-регрессивных этапов развития ладожского бассейна, как правило, четко различаются по строению и литологическому составу, и представлены ленточными и гомогенными глинами глубоководных частей БЛЮ и Анцилового озера, соответственно, и песчаными и органно-минеральными отложениями ладожской трансгрессии.

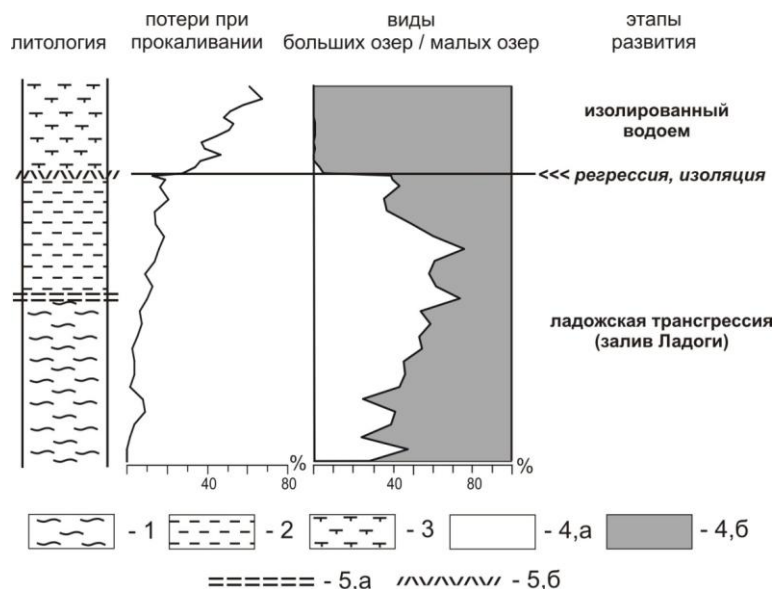


Рис. 1. Изменения состава донных отложений (в т.ч. содержания органического вещества = «потери при прокаливании») и диатомовых комплексов при переходе от условий крупного бассейна к условиям малого изолированного водоема (на примере озера Св. Сергия (Лауринлампи), о. Путсаари, северная часть Ладожского озера). Условные обозначения: 1 – глина, 2- алевритовая гиттия, 3 – детритовая (торфянистая) гиттия; 4 – процентное содержание диатомей: а – «видов больших озер», б – «видов малых озер»; 5 – характер литологических границ: а – постепенная, б – резкая.

Выявлены также виды диатомей, наиболее характерные для рассматриваемых этапов. В отложениях БЛО преобладают планктонные диатомеи, среди наиболее массовых видов – североальпийские *Aulacoseira islandica*, *A. subarctica* и *Cyclotella schumannii*, бореальные *C. bodanica* и *Stephanodiscus niagarae*, космополитные *Cyclotella radiosa* и *Stephanodiscus rotula* [5]. Характерной особенностью является низкая концентрация створок в осадках и присутствие в составе диатомовых комплексов переотложенных створок морских диатомей. Планктонные виды диатомей, характерных для анциловых отложений, представлены североальпийскими *A. islandica* и *C. schumannii*, бореальными *Stephanodiscus medius* и *S. niagarae*, космополитами *C. radiosa*, *Stephanodiscus minutulus* и *S. rotula*. Среди типичных бентосных видов североальпийские *Eunotia clevei* и *Didymosphenia geminata*, бореальные *Epithemia hyndmannii*, *Ellerbeckia arenaria*, *Navicula jentzschii* и *N. tuscula*, и виды широкого географического распространения *Cocconeis pediculus* и *Rhoicosphenia abbreviata* [6]. Для отложений ладожской трансгрессии характерны планктонные *A. islandica*, *C. schumannii*, *Stephanodiscus* spp, а также ряд бентосных видов (североальпийские *Achnanthes calcar*, *A. joursacense*, *A. oestrupii*, *E. clevei*, *Navicula aboensis*, бореальные *E. arenaria*, *Navicula jaernefeltii*, *N. jentzschii* и др.) [7].

В ходе палеолимнологических исследований малых озер Приладожья, проводившихся начиная с 1960-х гг., изучено около 40 разрезов донных отложений [8]. Большинство работ проводилось с целью реконструкции изменений природно-климатических обстановок, при этом во многих из них содержатся указания на присутствие в изученных разрезах отложений, соответствующих различным трансгрессивно-регрессивным этапам развития ладожского бассейна. Ряд исследований, в том числе, выполненных авторским коллективом, посвящен вопросам изменения уровня Ладожского озера и направлен на выявление свидетельств проникновения в котловины малых водоемов вод крупных пресноводных палеобассейнов [9-14]. Обзор полученных за рассматриваемый период результатов [8] показывает, что малые озера, в котловинах которых вскрываются отложения БЛО, в настоящее время известны в Приладожье на отметках от 9 до 49 м над у.м. Отложения анциловой трансгрессии отмечены в котловинах малых

озер, расположенных на отметках от 9 до 27 м над у.м. Осадки, относимые к ладожской трансгрессии, установлены в малых водоемах в диапазоне высот от 11 до 18 м (рис. 2А).

Однако, имеющихся палеолимнологических данных также недостаточно для реконструкции максимальных уровней палеоводоемов на территории Приладожья, что связано со следующими причинами: 1) изученные объекты, в котловинах которых вскрыты отложения, формировавшиеся в одном палеобассейне, зачастую расположены на участках с разными амплитудами гляциоизостатического поднятия; 2) принадлежность отложений к тому или иному палеобассейну нередко устанавливалась на основании их возраста, определенного с помощью относительной хронологии; 3) отсутствует либо приводится недостаточно детальная характеристика диатомовых комплексов, что не дает возможности достоверно судить о проникновении вод крупного палеобассейна в котловину малого водоема.

Для реконструкции палеоуровней Ладожского озера авторами предлагается использование единого подхода, представляющего собой модификацию метода «изоляционных бассейнов». Поскольку, в отличие от морских побережий, где после завершения оледенения в общем случае наблюдается устойчивая тенденция к отступанию береговой линии, ускоряющемуся или замедляющемуся в зависимости от соотношения скоростей гляциоизостатического поднятия суши и эвстатического подъема уровня Мирового океана, в истории Ладожского озера выделяются три крупных трансгрессивно-регрессивных этапа, характеризующиеся значительными амплитудами изменения уровня, метод «изоляционных бассейнов» позволяет реконструировать не только общую динамику береговой линии Ладожского озера, но и изменения уровня в рамках каждого из этих этапов. Изучение изоляционных бассейнов (малых водоемов, находящихся на разных абсолютных отметках) должно проводиться на определенных ключевых участках, под которыми понимаются территории с одинаковой амплитудой гляциоизостатического поднятия, расположенные в предполагаемых границах максимальной стадии палеобассейна.

Ключевой участок должен включать водоемы, находящиеся на разных отметках («лестница» объектов), при этом отметка порога стока наиболее высоко расположенного водоема должна превышать предполагаемую максимальную отметку уровня древнего бассейна на данной территории (рис.2Б,№1). В этом случае наибольший уровень подъема воды в рассматриваемую трансгрессивную фазу будет находиться в интервале между отметкой водоема, в котором ее отложения отсутствуют, и отметкой следующего по высоте изоляционного бассейна.

Важную информацию о скорости и амплитуде регрессии дает мощность переходного горизонта (при его наличии) и характер литологических контактов в отложениях изоляционных бассейнов. Наличие эрозионного контакта свидетельствует о том, что в ходе регрессии уровень большого бассейна опустился до отметки, близкой к отметке порога стока, либо ниже ее (рис. 2Б, № 3), что вызвало перерыв в осадконакоплении (в т.ч. с размывом верхней части толщи отложений большого бассейна).

В свою очередь, постепенный переход к отложениям малого озера свидетельствует о том, что возникший после регрессии реликтовый водоем, оставался достаточно глубоководным, что предотвратило размыв в его котловине осадков крупного бассейна. При наличии постепенного перехода в нескольких, последовательно расположенных изоляционных бассейнах (рис.2Б, №5,6), амплитуду регрессии можно оценить, исходя из отметки порога стока наиболее высоко расположенного из них и следующего по высоте водоема, в котором отмечен эрозионный контакт (рис. 2Б,№4). Кроме того, независимо от времени формирования, наличие постепенных переходов от отложений трансгрессивной фазы крупного водоема к отложениям малого водоема может быть связано с тем, что изоляция стала следствием гляциоизостатического воздымания территории. Такие объекты должны преобладать в северной части Приладожья, характеризующейся большими скоростями и амплитудами поднятия, и в пределах одного ключевого участка располагаться на более высоких абсолютных отметках (рис. 2Б, № 2), чем объекты, изоляция которых произошла в ходе регрессии палеобассейна.

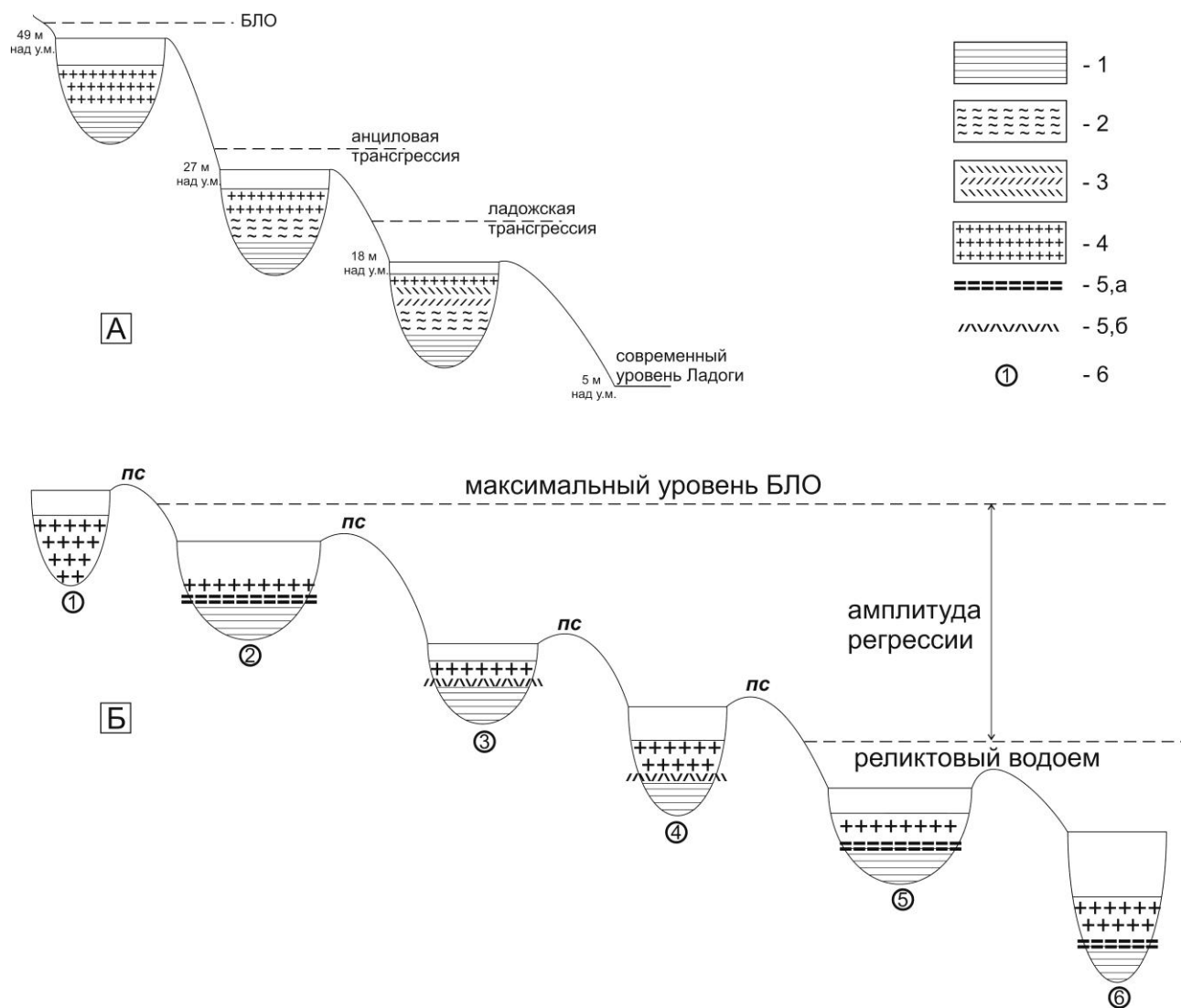


Рис. 2. А: Обобщенная схема строения донных отложений разновысотных изоляционных бассейнов Приладожья. Б: Применение метода «изоляционных бассейнов» для реконструкции изменений уровня отдельных трансгрессивно-регрессивных этапов Ладожского озера (на примере БЛО). Условные обозначения: отложения 1 – БЛО, 2 – Анцилового озера, 3 – ладожской трансгрессии, 4 – малого водоема; 5 – характер литологических контактов (а – постепенный, б – эрозионный); 6 – примеры изоляционных бассейнов (см. объяснения в тексте). ПС – порог стока.

Озера, расположенные на более низких абсолютных отметках и зачастую содержащие осадки нескольких трансгрессивных фаз ладожских палеобассейнов, представляют интерес с точки зрения реконструкции уровня наиболее «молодой» из них (рис.2А).

Применение диатомового анализа для установления принадлежности позднеледниковых и раннеголоценовых отложений к тому или иному палеобассейну имеет определенное ограничение, связанное с тем, что осадки этого времени нередко оказываются бедны створками диатомей вследствие низкой продуктивности водоемов. Не всегда также могут присутствовать надежные литологические признаки (например, сезонная слоистость), позволяющие отнести рассматриваемые отложения к крупному или малому водоему. В частности, отложения мелководной зоны БЛО или Анцилового озера могут отличаться от таковых из глубоководной зоны этих бассейнов, и иметь сходство с синхронными минерогенными осадками малых озер. В этом случае в качестве дополнительного источника информации об обстановках формирования отложений, обнаруженных в котловине изоляционного бассейна предлагается использовать

данные минерально-химического анализа, позволяющего, в частности, установить, является ли источник минерального материала локальным или региональным.

Для получения более детальной картины изменения уровня Ладожского озера в прошлом, исследования, проводимые с использованием метода «изоляционных бассейнов», должны дополняться изучением геоморфологического строения ключевого участка (в первую очередь древних береговых форм рельефа), а также разрезов озерно-болотных отложений.

Исследование частично поддерживается грантом РФФИ 16-05-00727А.

#### Литература:

1. Bjoerck S. A review of the history of the Baltic Sea 13.0-8.0 ka BP // *Quaternary International*. – 1995. - Vol. 27 – p. 19-40.
2. Севастьянов Д. В., Субетто Д. А., Сикацкая Е. Д., Степочкина О. Е. Особенности эволюции озерно-речной сети в бассейне Ладожского озера в голоцене // *Вестник СПбГУ*. – 2001. – Серия 7. Вып. 1. – с. 88-100.
3. Sundelin U. Fornsjöstudier inom Stångåns och Svartåns vattenområden, med speciell hänsyn till den sen- och postglaciala klimatutvecklingen. – 1917.
4. Long A. J., Roberts D. H., Wright M. R. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change on Arveprinsen Ejland, Disko Bugt, West Greenland // *Journal of Quaternary Science*. – 1999. – Vol. 14. – p. 323-345.
5. Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. – Л.: «Наука», 1985. – 244 с.
6. Жузе А. П. Диатомовые водоросли в морских и континентальных отложениях голоценового возраста // *Вопросы голоцена*. – Вильнюс, 1961. – с. 115-139.
7. Лудикова А. В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа // *Известия РГО*. – 2015. – Вып. 4. – с. 38-51.
8. Кузнецов Д. Д. Трансформация палеобассейнов на территории Карельского перешейка в позднем неоплейстоцене и голоцене (по данным изучения донных отложений озер). Автореф. дисс. ... канд. геогр. Наук. – СПб, 2014. – 22 с.
9. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 322. – p. 205-215.
10. Miettinen J. O., Grönlund E., Simola H., Huttunen P. Palaeolimnology of Lake Pieni-Kuuppalanlampi (Kurkijoki, Karelian Republic, Russia): isolation history, lake ecosystem development and long-term agricultural impact // *Journal of Paleolimnology*. – 2002. – Vol. 27. – p. 29-44.
11. Лудикова А. В., Субетто Д. А., Давыдова Н. Н., Сапелко Т. В., Арсланов Х. А. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолиимнологических исследований оз. Святого Сергия на о. Путсаари) // *Известия РГО*. – 2005. – Т. 137. – Вып. 6. – с. 34-41
12. Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В., Долуханов П. М., Зайцева Г. И. История формирования стока из Ладожского озера: новые палеолиимнологические данные // *Материалы конференции «Радиоуглерод в археологических и палеоэкологических исследованиях» Санкт-Петербург, 9-12 апреля 2007 г.* – СПб: «Теза», 2007. – с. 381-403.
13. Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Лудикова А. В., Сапелко Т. В. Голоценовые отложения малых озер Приладожья и реконструкция трансгрессивно-регрессивной деятельности Ладожского озера // *Квартер во всем его многообразии: Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода*. – Апатиты, 2011. – с. 305-306.
14. Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Корнеев Н. Ю., Денисенков В. П., Лудикова А. В. Палеолиимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) // *Известия РГО*, Т. 146, вып. 3, 2014, с.29-40.



## THE USE OF ISOLATION BASINS APPROACH IN RECONSTRUCTING LAKE LADOGA LEVEL CHANGES

Anna Valerjevna Ludikova  
Candidate of Sciences, researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

E-mail: [ellerbeckia@yandex.ru](mailto:ellerbeckia@yandex.ru)

Denis Dmitrievich Kuznetsov  
Candidate of Sciences, researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

E-mail: [dd\\_kuznetsov@mail.ru](mailto:dd_kuznetsov@mail.ru)

Dmitry Aleksandrovich Subetto  
Doctor of Science, director of the Institute of the Water Problems of the North, RAS

E-mail: [subetto@mail.ru](mailto:subetto@mail.ru)

Tatyana Valentinovna Sapelko,  
Candidate of Sciences, senior researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Abstract:* The paper discusses an application of the isolation basins approach traditionally used in relative sea-level studies, in reconstructing Lake Ladoga level changes during the transgressive-regressive stages of the Baltic Ice Lake, Ancylus Lake and Lake Ladoga itself. The approach is based on the fact that the sediments and diatom assemblages accumulated in a small lake basin while it was incorporated into the large lake differ significantly from those accumulated after its isolation from the large lake. Studying the small lakes «staircases» located within the key areas in Lake Ladoga region enables reconstructing Ladoga paleo-shoreline shifts starting from the Late Glacial as well as its level changes within a particular transgressive-regressive stage.

*Key words:* Lake Ladoga level changes, isolation basins

## ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ И ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ПЕСТИЦИДОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ СЕВЕРНОГО ПРИХУБСУГУЛЬЯ В 2008-2015

Елена Анатольевна Мамонтова,  
к.м.н., старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [elenam@igc.irk.ru](mailto:elenam@igc.irk.ru)

Евгения Николаевна Тарасова  
к.х.н., старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [tarasova@igc.irk.ru](mailto:tarasova@igc.irk.ru)

Александр Анатольевич Мамонтов  
к.б.н., старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [mamontov@igc.irk.ru](mailto:mamontov@igc.irk.ru)

Аркадий Владимирович Горегляд  
к.г.-м.н., главный специалист  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [agor@igc.irk.ru](mailto:agor@igc.irk.ru)

Лилия Леонидовна Ткаченко  
ведущий инженер  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [lili@igc.irk.ru](mailto:lili@igc.irk.ru)

*Аннотация:* В сообщении представлены данные исследования полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) в атмосферном воздухе в северном Прихубсугулье в 2008-2015 гг. Выявлены факторы, влияющие на изменения концентраций ПХБ и ХОП в воздухе, а также рассмотрена взаимосвязь содержания ПХБ и ХОП в воздухе и почвах побережья оз. Хубсугул, донных отложениях и планктоне озера.

*Ключевые слова:* ПХБ, ХОП, атмосферный воздух, тренды, факторы

Хлорорганические пестициды (ХОП, в т.ч. дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты, гексахлорциклогексан (ГХЦГ), гексахлорбензол (ГХБ)) и полихлорированные бифенилы (ПХБ) входят в списки Стокгольмской, Роттердамской и Базельской конвенций. Они токсичны и способны накапливаться по пищевым цепям и сохраняться в объектах окружающей среды длительное время [7]. В результате трансграничного переноса и накопления в удаленных от источников областях загрязнение ПХБ и ХОП окружающей среды становится проблемой как в промышленно развитых районах, так и в фоновых регионах мира [7, 10, 12].

Цель настоящего исследования – рассмотреть временные изменения данных соединений в атмосферном воздухе (АВ) северного Прихубсугулья, факторы, влияющих на них, а также влияние атмосферного переноса на содержание ПХБ и ХОП в почвах, донных отложениях и биоте озера.

Пассивные воздушные пробоотборники (ПВП) с картриджами из полиуретановой пены для исследования ПХБ и ХОП в АВ были установлены на базе стационара «Ханх» ИГХ СО РАН в пос. Ханх на северном побережье оз. Хубсугул (51°30'55" N, 100°39'01" E, 1632 м над уровнем моря). Длительность периода каждого пробоотбора составила в среднем 70 дней.

Методики анализа проб, подготовки дисков, обслуживания пробоотборников, анализа использованных в настоящем исследовании аналогичны методике, используемой в подобных исследованиях за рубежом [8, 9], и подробно описаны в [2, 3]. Во всех пробах определяли 28

конгенов ПХБ, а также пестициды *pp'*-ДДТ и его метаболиты *pp'*-дихлордифенилдихлорэтан (*pp'*-ДДД), *pp'*-дихлордифенилдихлорэтилен (*pp'*-ДДЭ),  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -ГХЦГ и ГХБ. Анализ проводился с использованием газового хроматографа HP 5890 series II с детектором электронного захвата. При расчетах концентрации ПХБ и ХОП в АВ принимали, что в день через пробоотборник и сорбирующую среду проходит примерно 3–4 м<sup>3</sup>. Данная величина получена в эксперименте в сравнении с активным пробоотбором [11] и подтверждена в практических исследованиях [10].

Суммарная концентрация ПХБ в атмосферном воздухе (АВ) в северном Прихубсугулье в 2008-2015 гг. изменялась от 6 пг/м<sup>3</sup> до 5.6 нг/м<sup>3</sup>, ДДТ и его метаболитов – от 0.3 до 720 пг/м<sup>3</sup>, суммы  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -изомеров ГХЦГ – от 1.8 до 61 пг/м<sup>3</sup> и ГХБ – от 6 до 140 пг/м<sup>3</sup>. Уровни ПХБ и ХОП в АВ в течении всего периода наблюдений были значительно ниже ПДК и ОБУВ принятых в России (ГН 1.2.3111–13, ГОСТ 12.1.005–88) (ДДТ – 0.001, ГХБ – 0.013, ГХЦГ – 0.001 и ПХБ – 1 мг/м<sup>3</sup>).

Наблюдается тенденция к увеличению концентраций ГХБ в АВ. Среднегодовые концентрации ГХБ в 2012-2015 достоверно выше, чем в 2008, и в 2012, 2014-2015 гг. выше, чем в 2010 ( $p < 0.05$ ). И, наоборот, концентрации ГХЦГ уменьшаются в исследованный период времени. Средние уровни  $\alpha$ -ГХЦГ в 2008–2009 гг. и  $\gamma$ -ГХЦГ в 2010 г. достоверно выше, чем в 2011 и 2013-2015 гг. ( $p < 0.05$ ).

Самые высокие концентрации ПХБ и ДДТ отмечались в 2008–2010 гг. В 2009 г. уровни ПХБ и ДДТ были достоверно выше, чем в 2011-2015 гг. ( $p < 0.05$ ). Достоверного изменения уровней суммы ПХБ в 2011–2013 гг. не найдено. Однако, отмечено увеличение величин суммы триХБ в 2015 по сравнению с 2012-2013 гг. и тетраХБ в 2014 по сравнению с 2013 г. и уменьшение гептаХБ в 2013 по сравнению с 2012 г. ( $p < 0.05$ ). Статистически достоверное уменьшение величин суммы ДДТ и его метаболитов и *p,p'*-ДДТ отмечено в 2014 г по сравнению с 2013 и 2012 гг.

Кроме изменения суммарных концентраций ПХБ и ХОП в АВ в 2008–2015 гг. происходило также изменение их качественного состава (рис. 1). Отношение  $\alpha$ -ГХЦГ/ $\gamma$ -ГХЦГ в 2008-2014 гг. было выше единицы, что предполагает преимущественное использование технической смеси ГХЦГ, а не линдана (90%  $\gamma$ -ГХЦГ) [1]. В марте-сентябре 2015 г. отношение  $\alpha$ -ГХЦГ/ $\gamma$ -ГХЦГ снизилось до 0.22-0.73, что говорит о новом поступлении линдана в АВ Прихубсугулья, несмотря на запрет его использования в Монголии. Отношение (ДДЭ+ДДД)/ДДТ изменялось от 0.27 до 6.1, что указывает как о «свежем», так и о «старом» поступлении ДДТ [1].

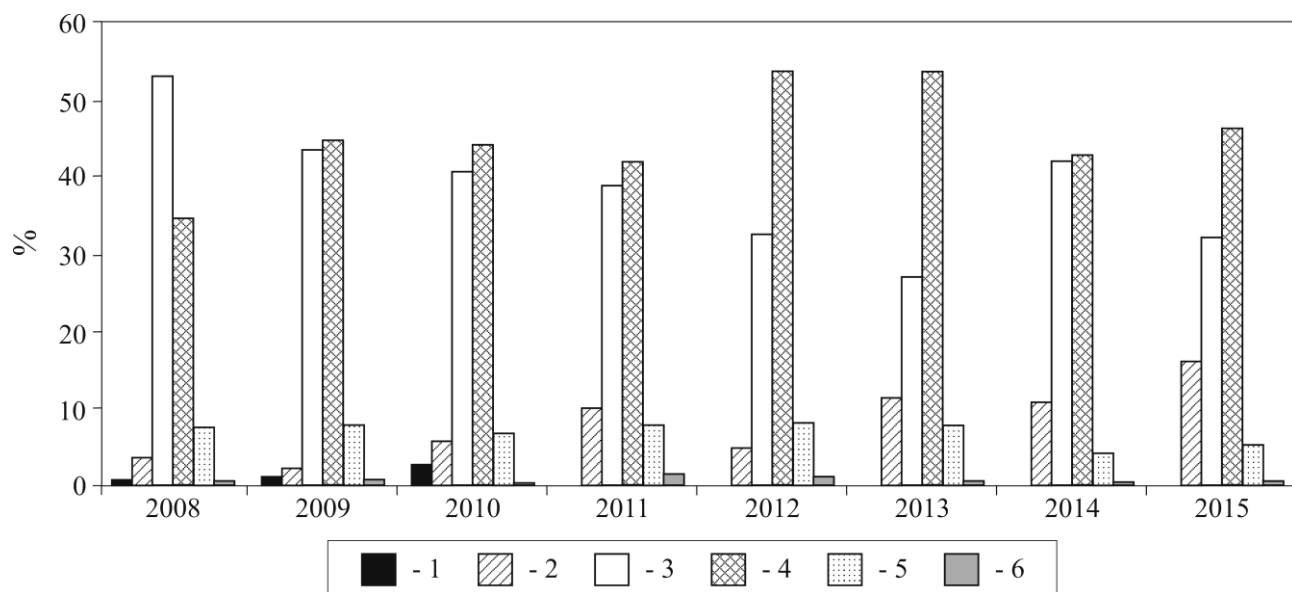


Рис. 1. Относительный гомологический состав ПХБ в атмосферном воздухе в 2008–2013 гг. (%) (1 – диХБ, 2 – триХБ, 3 – тетраХБ, 4 – пентаХБ, 5 – гексаХБ, 6 – гептаХБ).

Изменение относительного качественного состава ПХБ и ХОП предполагает различные источники поступления этих соединений в АВ Прихубсугулья в течении периода исследования. Увеличение доли низкохлорированных триХБ говорит об увеличении значения атмосферного переноса. Повышение концентраций в 2008–2010 гг. предполагает интенсивное поступление ПХБ и ДДТ в АВ Прихубсугулья в этот период времени как в результате действия возможных неизвестных локальных источников, так и влияния в некоторой степени атмосферного переноса с сопредельных территорий. Концентрации ПХБ и ХОП в АВ Прихубсугулья в 2011–2015 гг. можно рассматривать как уровни вне действия возможных локальных источников. В 2008–2009 гг. повышение уровней ПХБ в АВ отмечалось также в Китае (до 7700 пг/м<sup>3</sup>) и России (до 3530 пг/м<sup>3</sup>) [3, 8]. В Российской Арктике максимальные концентрации ПХБ достигали 640 пг/м<sup>3</sup> в 2007 г., 683 пг/м<sup>3</sup> в 2008 и 1810 пг/м<sup>3</sup> в 2010 [4–6]. Максимальные суммарные концентрации ДДТ и его метаболитов в воздухе Российской Арктики в 2010 г. составляли 1530 пг/м<sup>3</sup> [6].

В целом, концентрации ПХБ, ДДТ, ГХЦГ и ГХБ в АВ в северном Прихубсугулье в 2008–2015 гг. находятся в пределах величин, полученных в исследованиях данных соединений в АВ методом ППАВ как в глобальном проекте GAPS [10], так и в странах Азии и в России [3, 8, 9] и изменяются от фоновых и сравнимых с уровнями в других высокогорных областях мира до величин, найденных в крупных населенных пунктах.

Результаты исследований ПХБ и ХОП в АВ в 2011–2015 гг. были использованы для изучения взаимосвязи содержания ПХБ и ХОП и приповерхностной температуры воздуха.

В период 2011–2015 гг. отмечено изменение концентраций ПХБ и ХОП в зависимости от сезона года: наибольшие уровни обнаружены в теплое время года, когда происходит активизация процессов испарения ПХБ и ХОП с поверхности почв и, наоборот, наименьшие – в холодное, когда преобладают процессы осаждения. Наиболее четко эта закономерность прослеживается для годов, когда самые высокие уровни получены для периода с средней суточной температурой воздуха выше 10°C, а не для годов, когда летние циклы отбора приходились на период, когда средняя суточная температура воздуха выше 0°C.

Для определение взаимосвязи изменения содержания ПХБ и ХОП в АВ в Прихубсугулье и изменения климата использованы данные среднегодовых аномалий температур у поверхности Земли, осредненные по территории Земного шара и Северного полушария ([www.cru.uea.ac.uk](http://www.cru.uea.ac.uk)). Получена достоверная положительная взаимосвязь содержания суммы ПХБ, три-ХБ, тетра-ХБ, пента-ХБ в АВ Прихубсугулья и аномалиями температур над сушей и морем, над сушей Земного шара и Северного полушария и  $\gamma$ -ГХЦГ и аномалиями температур над сушей Земного шара и Северного полушария.

Результаты моделирования потоков ПХБ и ХОП в системе АВ – почва в районе исследования (на территории стационара в пос. Ханх и его окрестностях) указывают на преобладание процессов осаждения.

Влияние атмосферного переноса на содержание ПХБ и ХОП в объектах окружающей среды Прихубсугулья и оз. Хубсугул рассмотрено с использованием факторного анализа. Распределение ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе определяется в разные периоды исследования двумя факторами (I и III). Первый фактор оказывал большее влияние в 2008–2010 и части 2011 года, когда концентрации ПХБ и ДДТ в воздухе были наибольшими, и в отдельные периоды 2014 года, а третий фактор – в периоды наименьших концентраций, которые соответствуют или даже ниже концентрациям найденным в исследованиях в фоновых районах мира. Т.о. третьим фактором, вероятно, является глобальный и региональный атмосферный перенос ПХБ и ХОП. Третий фактор оказывает также влияние на содержание ПХБ и ХОП в донных отложениях озера Хубсугул. Отсутствие значительного влияния первых трех факторов на состав ПХБ и ХОП в зоопланктоне озера связано с внутриводоемными процессами и биологическими процессами трансформации ПХБ и ХОП.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-05-00896 и проекта НИР 69.1.1.

#### Литература:

1. Галиулин Р. В., Галиулина Р. А. Эколого-геохимическая оценка «отпечатков» стойких хлорорганических пестицидов в системе почва-поверхностная вода // *Агрохимия*. – 2008. – № 1. – С. 52–56.
2. Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Левшина С. И., Юрченко С. Г., Мамонтов А. А. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в системе атмосферный воздух – почва на юге Дальнего Востока России // *Метеорология и гидрология*. – 2014. – № 11. – С. 45–55.
3. Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Мамонтов А. А., Кузьмин М. И., Борисов Б. З., Бульбан А. П., Юрченко С. Г., Лепская Е. В., Левшина С. И., Трегубов О. Д. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе некоторых территорий Сибири и Дальнего Востока России // *География и природные ресурсы*. – 2012. – № 4. – С. 40–47.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, А. В. Цыбань, Г. М. Черногаевой, В. В. Челюканова, В. И. Егорова. – М., Росгидромет, 2008, 164 с.
5. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, А. В. Цыбань, Г. М. Черногаевой, В. В. Челюканова, В. И. Егорова, А. С. Зеленова. – М., Росгидромет, 2009, 182 с.
6. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2010 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, Г. М. Черногаевой, В. И. Егорова, А. С. Зеленова, Ю. В. Пешкова. – М., Росгидромет, 2011, 188 с.
7. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). – Oslo, Norway, 1998, 859 p.
8. Hogarth J. N., Seike N., Kobara Y., Habib A., Nam J.-J., Lee J.-S., Li Q., Liu X., Li J., Zhang G., Masunaga S. Passive air monitoring of PCBs and PCNs across East Asia: A comprehensive congener evaluation for source characterization // *Chemosphere*. – 2012. – vol. 86. – P. 718–726.
9. Jaward F. M., Zhang G., Jae Jak Nam, Sweetman A. j., Obbard J. P., Kobara Y., Jones K. C. Passive air sampling of polychlorinated biphenyls, organochlorine compounds, and polybrominated diphenyl ethers across Asia // *Environ. Sci. Technol.* – 2005. – vol. 39. – P. 8638–8645.
10. Pozo K., Harner T., Wania F., Muir D. C. G., Jones K., Barrie L. A. Toward a global network for persistent organic pollutants in air: results from the GAPS study // *Environ. Sci. Technol.* – 2006. – vol. 40. – P. 4867–4873.
11. Shoeib M., Harner T. Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants // *Environ. Sci. Technol.* – 2002. – vol. 36. – P. 4142–4151.
12. Wania F., Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environ. Sci. Technol.* – 1996. – vol. 30. – P. 390A–396A.

**THE CHANGING OF CONCENTRATIONS OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS AND  
ORGANOCHLORINE PESTICIDES IN ATMOSPHERIC AIR OF THE NORTHERN  
PRIHUBSUGUL AREA IN 2008-2015**

Elena Anatolievna Mamontova  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [elenam@igc.irk.ru](mailto:elenam@igc.irk.ru)  
Eugenia Nikolaevna Tarasova  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [tarasova@igc.irk.ru](mailto:tarasova@igc.irk.ru)  
Alexander Anatolievich Mamontov  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [mamontov@igc.irk.ru](mailto:mamontov@igc.irk.ru)  
Arkadiy Vladimirovich Goreglyad  
Ph.D, leading specialist  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [agor@igc.irk.ru](mailto:agor@igc.irk.ru)  
Lilia Leonidovna Tkachenko  
principal engineer  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [lili@igc.irk.ru](mailto:lili@igc.irk.ru)

*Annotation:* The results of the investigation of polychlorinated biphenyls (PCB) and organochlorine pesticides (OCP) in atmospheric air in the Northern Prihubsugul area in 2008-2015 are presented in the paper. Factors influencing on the variation of PCB and OCP concentration in air were found. The relationship of PCB and OCP levels in air and coastal soil, sediments and plankton of the Hovsgol Lake was investigated.

*Key words:* PCB, OCP, atmospheric air, trends, factors

## **ЭКОДИАГНОСТИКА НАГРУЗКИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Елена Анатольевна Минакова,  
*Казанский (Приволжский) Федеральный университет*  
*E-mail: ekologyhel@mail.ru*  
Анатолий Петрович Шлычков,  
*Институт проблем экологии и недропользования*  
*Академии наук Республики Татарстан,*  
*E-mail: anatoliy.shlychkov@yandex.ru*

*Аннотация:* В статье приведены результаты экодиагностической оценки антропогенной нагрузки, обусловленной влиянием факторов биогенной нагрузки на поверхностные воды Республики Татарстан, выполненные с использованием ГИС - технологий.

*Ключевые слова:* антропогенная нагрузка, факторы биогенной нагрузки, эфтрофикация ГИС - технологии, управление антропогенной нагрузкой

Речной бассейн представляет собой целостную геоэкологическую систему, стержнем которой является река. Функционирование этой геоэкосистемы и происходящих в ней процессов обеспечивает с одной стороны ее устойчивость, а с другой - динамичность процессов эволюции. Познание закономерностей протекания этих процессов позволит разработать и создать рациональные, безопасные для природных ресурсов методы управления устойчивым водопользованием и качеством поверхностных вод [3]. В естественных условиях водные ресурсы рек формируются под воздействием многочисленных факторов, среди которых необходимо выделить азональные и зональные. Азональные факторы: мезо - и микрорельеф, геологическое строение, почвы, снежный покров, микроклимат и т. д. оказывают большое влияние на сток с водосборов малых рек [11]. Однако в последнее время существенное влияние на речные экосистемы оказывают и антропогенные факторы, которые в значительной степени изменяют условия протекания естественных процессов. Именно эти факторы определяют особенности формирования поверхностных вод, что проявляется в большой изменчивости и разнообразии не только какой-то одной, но и всех рядом расположенных рек.

Сегодня эвтрофирование водоемов является одной из наиболее актуальных проблем поверхностных вод. Согласно [1] эфтрофикация - повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием природных и антропогенных факторов. Основной движущей силой процессов эвтрофикации водоемов являются биогенные элементы (соединения азота, фосфора, углерода). В настоящее время биогеохимические циклы фосфора и азота – важных биогенных элементов, определяющих продуктивность и структурно-функциональную организацию экосистем, подвержены значительным биосферным преобразованиям. В современный период антропогенное воздействие вносит существенные изменения в природные процессы, нарушая естественные геохимические круговороты биогенных веществ и запуская процессы эфтрофикации, скорость прохождения которых в сложившихся условиях значительно сокращается вплоть до нескольких десятилетий [10]. Лишь часть биогенных элементов в составе минеральных удобрений остается в наземном круговороте, другая часть, попадая с поверхностным стоком в поверхностные воды, ускоряет продукцию автохтонного органического вещества в водоемах и развитие глобального процесса антропогенного эвтрофирования водоемов, что влечет за собой существенные нарушения в функционировании гидроэкосистем.

Основными антропогенными источниками, загрязняющими водоемы биогенными элементами, являются организованные источники (сбросы промышленных и коммунальных

предприятий), а также неорганизованные (диффузные) источники (животноводческие фермы, сельскохозяйственные угодья, поверхностный сток с урбанизированных территорий) [2,4,8].

Информационной основой для определения экологических проблем, выбора наиболее рациональных и экономически обоснованных путей их решения является так называемая экодиагностика территории. Подобный тип картографирования является одним из направлений экодиагностики, позволяющей получить объективную и достоверную информацию о состоянии окружающей среды определенной территории, пространственной дифференциации экологических проблем и их сочетаний [12].

В продолжение предыдущих исследований [5,6,7,9], данная работа посвящена составлению экодиагностической карты нагрузки биогенных веществ по территории РТ в разрезе муниципальных районов. В работе использованы материалы Государственных докладов «О состоянии природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Татарстан», данные федерального статистического наблюдения по форме № 2-ТП (водхоз) «Сведения об использовании воды».

Водные ресурсы являются основным фактором развития благополучия территории и занимают особое место в экономике и решении социальных задачах. При составлении карт экологических ситуаций крайне важным является выбор конкретного перечня факторов, влияющих на развитие экологического состояния данной природной среды. В качестве антропогенных факторов, вызывающих значительные изменения сложившегося геохимического фона речных вод, рассмотрены следующие факторы, принятые в качестве индикаторов состояния речных вод:

- сброс сточных вод - ведет к загрязнению и истощению водных объектов;
- распаханность сельскохозяйственных угодий – способствуют непосредственному смыву почвенного слоя,
- животноводческие комплексы являются источником поступления биогенных элементов в поверхностные воды;
- использование минеральных удобрений и средств защиты растений - удобрения являются основным источником поступления в водоемы биогенных элементов, и приводят к эвтрофикации, а пестициды, кроме того, обладают токсическими свойствами, оказывающими негативное влияние на биоту.

Относительный вклад каждого из изученных антропогенных факторов в интегральную антропогенную нагрузку на поверхностные воды в природных регионах РТ выглядит следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

*Относительный вклад (%) отдельных факторов в интегральную антропогенную нагрузку на поверхностные воды РТ*

Физико-географические регионы РТ	Животноводство	Эрозия	Распаханность	Пестициды	Минеральные удобрения	Сбросы
Предволжье	36,0	20,6	22,2	14,2	6,8	0,2
Зап. Предкамье	35,7	21,3	17,3	13,0	12,3	0,4
Вост. Предкамье	31,3	25,3	25,0	8,2	8,3	1,9
Зап. Закамье	38,1	6,8	28,0	13,8	12,9	0,3
Вост. Закамье	42,4	9,7	16,9	10,4	13,1	7,3
Республика Татарстан	38,2	14,9	20,1	12,3	11,8	2,6

В среднем по РТ вклад животноводства составляет 38,2%, распаханности - 20,1%, эродированности - 14,9%, внесение пестицидов - 12,3%, внесение минеральных удобрений - 11,8%, водоотведения - 2,6%.



Следующим шагом после выявления и оценки экологических проблем является их ранжирование этих проблем по степени значимости их воздействия. В настоящей работе проведено ранжирование уровня антропогенной нагрузки по 3 м уровням (средний, выше и ниже среднего). Это дает возможность составить ситуационную экодиагностическую карту, которую можно использовать для принятия конкретных управленческих решений в области охраны окружающей среды. Рассчитанная нами интегральная антропогенная нагрузка на поверхностные воды РТ значительно дифференцирована (Табл. 2). Так, на большей части территории Предволжья (39,9%) уровень этой нагрузки “ниже среднего”. Уровень “средний” и “выше среднего” наблюдается соответственно на 30,5% и 29,5% площади территории, соответственно.

Таблица 2

*Ранжирование территории природных регионов РТ (в %) по уровню интегральной антропогенной нагрузки*

Физико -географические регионы РТ	Уровень интегрального антропогенного воздействия		
	ниже среднего	средний	выше среднего
Предволжье	39,9	30,5	29,5
Западное Предкамье	7,6	42,8	49,5
Восточное Предкамье	-	100,0	-
Западное Закамье	36,1	51,1	12,8
Восточное Закамье	26,0	40,6	33,4
Республика Татарстан	29,3	39,7	31,0

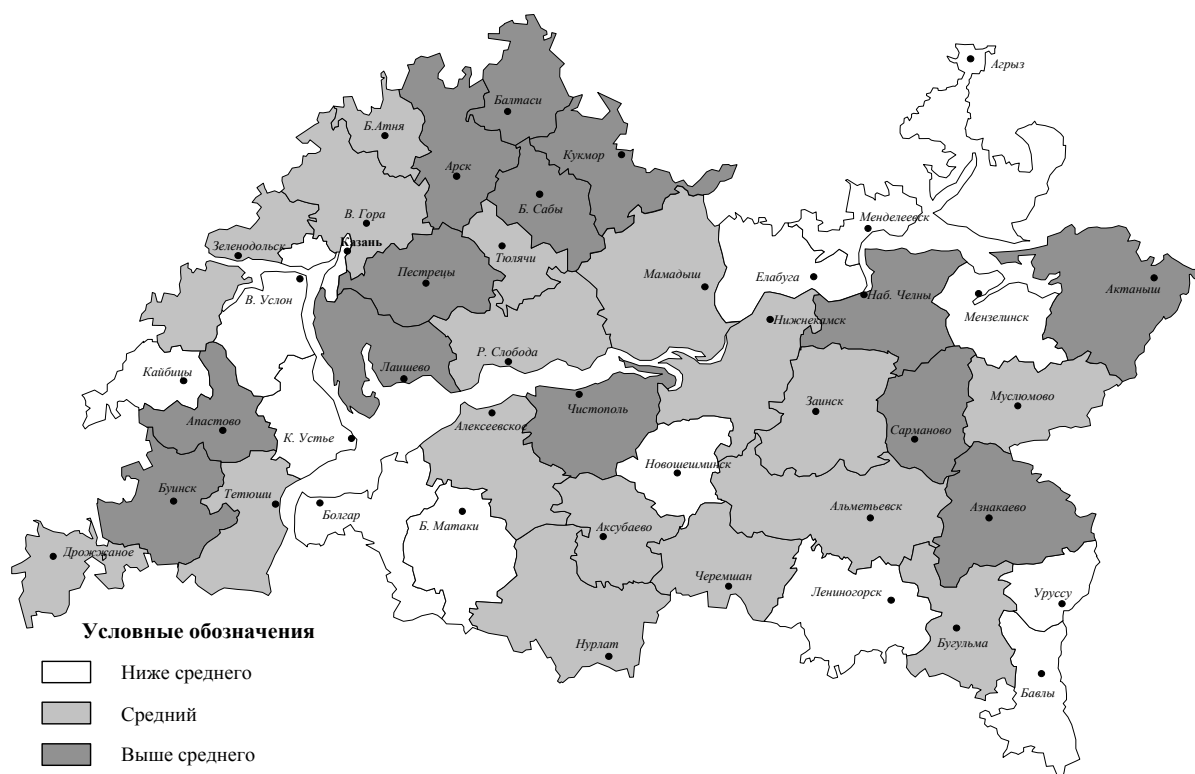
В Западном Предкамье большая часть территории (49,5%) характеризуется уровнем комплексной антропогенной нагрузки “выше среднего”, для значительной части территории (42,8%) свойственен уровень “средний”, и лишь для 7,6% характерен уровень “ниже среднего”.

В Восточном Предкамье на всей территории наблюдается средний уровень интегральной антропогенной нагрузки на речные воды.

На территории Закамья до половины площади характеризуется “средним” уровнем интегральной антропогенной нагрузки; значительная часть территории (33-36%) имеет уровень нагрузки “ниже среднего”, а на 13-26 % площади отмечен уровень нагрузки на поверхностные воды “выше среднего”. Наибольшая величина интегральной антропогенной нагрузки на поверхностные воды РТ наблюдается в Тукаевском, а наименьшая - в Ютазинском районах.

В целом же по РТ для значительной части территории (39,7%) характерен уровень интегральной антропогенной нагрузки “средний”, уровень “выше среднего” свойственен для 31,0%, а 29,3% территории имеют уровень “ниже среднего”.

С использованием ГИС SURFER на основе рассчитанных данных нами были построены экодиагностические карты пофакторной и интегральной антропогенной нагрузки биогенных веществ на речные воды, а также рассчитано распределение площадей природных регионов РТ по уровням нагрузки от отдельных видов антропогенного воздействия. На базе построенных нами тематических карт, каждая из которых отражает антропогенную нагрузку от отдельных видов хозяйственного воздействия, влияющих на состояние речных вод РТ, нами была создана экодиагностическая карта интегральной антропогенной нагрузки с стороны вышеперечисленных факторов (рис. 1.).



*Рис. 1. Экодиагностическая карта интегральной антропогенной нагрузки на речные воды по муниципальным образованиям Республики Татарстан.*

Таким образом, нами выполнена оценка воздействия антропогенной нагрузки на речные воды РТ по муниципальным образованиям. Средний уровень антропогенной нагрузки на поверхностные воды предложено принять за норму, на основе которой возможно принятие управленческих решений по регулированию качества речных вод путем поэтапного приближения к заданному уровню как интегральной, так и пофакторной антропогенной нагрузки. Использование подобных показателей позволяет выделить районы республики, в которых необходимо проведение первоочередных природоохранных мероприятий и повышает эффективность управления качеством поверхностных вод. Подобная экодиагностическая оценка территории в природоохранной практике необходима для выработки оптимальной стратегии вывода территории из экологического неблагополучия, определения комплекса необходимых превентивных мер, дифференцированных в зависимости от величины этого риска и рационального финансирования природоохранных мероприятий.

#### Литература:

1. Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 232 с.
2. Латыпова В. З. Развитие биогеохимических подходов к экологическому нормированию химической нагрузки на природные среды / В. З. Латыпова, С. Ю. Селивановская, Н. Ю. Степанова, Е. А. Минакова // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2005. Т. 147. № 1. С. 159-170.
3. Малые реки России (использование, регулирование, охрана, методы водохозяйственных расчетов) / Под ред. Черняева А. М. - Свердловск: Сред. - Урал. кн. изд-во, 1988. - 320 с.
4. Минакова Е. А. Подходы к региональному нормированию нагрузки на водосборную площадь реки / Е. А. Минакова, В. З. Латыпова, Ю. П. Переведенцев // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 12. С. 36-40.

5. Минакова Е. А. Подходы к устойчивому управлению качеством поверхностных вод / Е. А. Минакова А. П. Шлычков, В. З. Латыпова // Проблемы региональной экологии. 2009. № 4. С. 102-107.
6. Минакова Е. А. Формирование качества поверхностных вод малых рек в различных физико-географических районах Республики Татарстан / Е. А. Минакова, А. П. Шлычков, В. З. Латыпова, Р. Н. Давыдов, А. Р. Ильясова // Проблемы региональной экологии. 2012. № 5. С. 7-13.
7. Минакова Е. А. Оценка антропогенной нагрузки предприятий на водные объекты Республики Татарстан / Е. А. Минакова, А. Ю. Мелквист, Е. Г. Мухаметшина, А. П. Шлычков, А. В. Сушкова // Экология и промышленность России. 2013. № 6. С. 39-41.
8. Минакова Е. А. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок на водные экосистемы / Е. А. Минакова, В. З. Латыпова, Н. Ю. Степанова / Экологический консалтинг № 4 (16), Казань, С.3-10, 2004 г.
9. Учет метеорологических факторов в управлении качеством поверхностных вод (на примере рек Казанка, Свияга, Степной Зай) / Минакова Е. А. диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Институт озероведения РАН. Санкт-Петербург, 2004.
10. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирующие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: «Гидрометеиздат», 1990 г. 278 с.
11. Черняев А. М., Дальков М. П., Прохорова Н. Б., Шахов М. П. Бассейн - 1 Эколого-водохозяйственные проблемы, рациональное водопользование / РосНИИВХ. - Екатеринбург: Изд-во «Виктор», 1995. - 336 с.
12. Экодиагностика и сбалансированное развитие: Уч. пос. /Б.И.Кочуров - 2 изд. -М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016 -362с.

#### **ECODIAGNOSTICS LOAD OF NUTRIENTS REPUBLIC OF TATARSTAN ON THE SURFACE OF WATER**

Minakova Elena Anatol'evna  
Kazan Federal University,  
E-mail: ekologyhel@mail.ru  
Anatolij Petrovich Shlychkov  
Institute of Ecology and Mineral Sciences  
of the Republic of Tatarstan,  
E-mail: anatolij.shlychkov@yandex.ru

*Abstract:* The results of ekodiagnosticheskoy assessment of anthropogenic load due to the influence of factors of nutrient loading on surface waters of the Republic of Tatarstan, made using GIS - technologies.

*Keywords:* anthropogenic load factors of nutrient loading, eutrophication GIS - technology, management of anthropogenic load.

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В ЩУЧЬЕМ ЗАЛИВЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Галина Геннадьевна Митрукова,  
к.б.н., младший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

e-mail: galya-21@mail.ru;

Лариса Леонидовна Капустина,  
к.б.н., старший научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

e-mail: larisa.kapustina@mail.ru;

Евгений Александрович Курашов,  
д.б.н., профессор, заведующий лабораторией гидробиологии,  
ИНОЗ РАН

e-mail: evgeny\_kurashov@mail.ru;

*Аннотация:* На акватории Щучьего залива проводились долговременные микробиологические исследования с начала 80-х годов прошлого столетия, когда на водоём оказывалось сильное антропогенное воздействие – поступление сточных вод Приозерского ЦБК. Исследования водоёма продолжились и после закрытия ЦБК в 1986 г. Особенно подробно экосистема залива изучалась в 2013 – 2014 гг. (на протяжении всего вегетационного сезона), а также в летний период 2015 – 2016 гг. Проведено сравнение качества воды Щучьего залива по микробиологическим показателям в различные временные периоды (как при антропогенном прессе, так и при его ослаблении), дана оценка современного экологического состояния залива.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, Щучий залив, бактериопланктон, микробиологические показатели, качество воды.

Микроорганизмы, обладая метаболическим и таксономическим разнообразием, быстрыми темпами роста, играют ведущую роль в процессах самоочищения водоёмов. Существенное влияние на бактериопланктон оказывает качественный состав и количество органических веществ [1]. Изменение концентрации растворимых органических субстратов приводит к изменению количества бактерий в водоёме, поэтому общая численность бактерий в воде является одним из основных показателей трофического статуса водоемов. Характеризовать качество воды с помощью микробиологических показателей можно по численности бактерий (и/или отдельных физиологических групп), величине бактериальной клетки, соотношению различных морфотипов микроорганизмов и интенсивности различных микробиологических процессов [2].

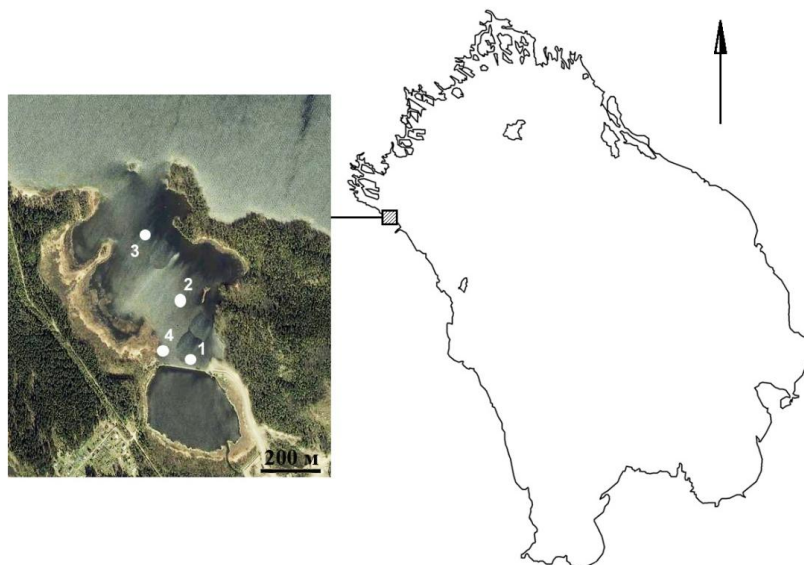
Щучий залив Ладожского озера расположен в западной части шхерного района Ладожского озера и имеет длину около 1 км при максимальной ширине 0.4 км, средняя глубина 2.0 м. В залив с середины 60-х годов через искусственно прорытый канал из водоёма-отстойника (оз. Дроздово) поступали сточные воды Приозерского ЦБК, который в 1986 г. был перепрофилирован в мебельный комбинат, а впоследствии в завод по выпуску древесно-волоконистых плит [3]. Вода из залива, под влиянием течений, направляется вдоль западного побережья к югу до Петрокрепостной губы, оказывая влияние на Невскую губу и р. Неву [4]. В настоящее время антропогенная нагрузка на Щучий залив уменьшилась в связи с закрытием Приозерского ЦБК и достаточно небольшими мощностями завода по выпуску древесно-волоконистых плит.

Цель работы - исследовать изменения, произошедшие в бактериальном сообществе данного водоёма.

Подробные микробиологические исследования микрофлоры Щучьего залива были проведены в 1975 – 1977 гг. на протяжении всего вегетационного сезона [4], в 1983, 1987, 1997, 2004, 2006 и 2009 гг. микробиологические исследования проводились в летний период [2]. В 2013-2014 гг. была

возможность подробно проследить динамику общей численности бактерий на четырёх станциях в Щучьем заливе с мая 2013 по октябрь 2014 гг. Отбор проб осуществлялся два раза в месяц. В 2015 г. пробы отбирались в начале июня, а в 2016 г. – во второй половине июля. Схема расположения станций представлена на рисунке 1. Определялись следующие микробиологические параметры: общая численность бактериопланктона [5], процентное соотношение различных морфологических типов бактериальных клеток и биомасса бактериопланктона на ст. 2 (центральная часть залива) в 2013 – 2016 гг.

Используя данные исследований с начала 80-х годов, можно проследить динамику некоторых микробиологических показателей в Щучьем заливе во время существования и после закрытия Приозерского целлюлозного комбината. Результаты, полученные в различные временные периоды, представлены в таблице 1. При сравнении общей численности микроорганизмов в разные годы, видно, что её величины после закрытия ЦБК в 1986 г. постепенно снижаются с 12.4 млн.кл.мл<sup>-1</sup> в 1987 г. до среднего значения в 2013-2015 гг. – 2.11 млн.кл.мл<sup>-1</sup>. Наблюдается и тенденция уменьшения палочковидных форм микроорганизмов с 73.4% до 54.8% (среднее значение за 2013-2016 гг. по 4 станциям). По-видимому, снижение количества бактериопланктона является также следствием постепенного снижения концентрации общего фосфора в воде. Так, если в 1987 г. прошлого столетия его концентрация в центре Щучьего залива составляла 0.43 – 0.68 мг л<sup>-1</sup>, то к 1997 г. уже снизилась до 0.017 – 0.071 мг л<sup>-1</sup>[3], в 2006 г. количество общего фосфора в воде варьировало в пределах 0.076 - 0.186 мг л<sup>-1</sup>[6], а к 2012 г. содержание общего фосфора снизилось до 0.018 – 0.038 мг л<sup>-1</sup>.



*Рис.1. Схема расположения станций в Щучьем заливе (Картографические данные © Google, 2016).*

При этом численность бактериопланктона в заливе в 1987 г. составляла 12.4 млн.кл.мл<sup>-1</sup> (ср. по 3-м станциям), к 1997 г. снизилась до 2.9 млн.кл.мл<sup>-1</sup> (ср. по 4-м станциям), а в 2006 г. была равна 1.8 млн.кл.мл<sup>-1</sup> (ср. по 2-м станциям). То есть, четко видна тенденция снижения общего количества бактерий в воде по мере уменьшения концентрации общего фосфора.

При анализе данных подробных исследований 2013 – 2016 гг. видно, что среднесезонные величины численности бактериопланктона на одной и той же станции, как в летний, так и в зимний период 2013 – 2014 гг. сохраняются примерно на одном уровне: 2.06 – 2.64 млн. кл. мл<sup>-1</sup> и 2.11 – 2.52 млн. кл. мл<sup>-1</sup> соответственно (рис. 2, таблица 1). Величины биомассы бактериопланктона в середине июля 2013 г. и конце января 2014 г. также сохранялись на одном уровне (0.648 мг/л., и 0.506 мг/л. соответственно). Отсутствие значительных сезонных колебаний численности и биомассы бактериопланктона может быть связано с постоянным подтоком загрязненных органическим веществом вод из оз. Дроздово, в которое вначале попадали сточные воды Приозерского ЦБК, а в дальнейшем – мебельного комбината и завода по выпуску древесно-волоконистых плит.

Таблица 1

Средние за сезон величины общей численности бактериопланктона (N) в Щучьем заливе  
Ладожского озера в разные годы

Период	Станция	N млн.кл.мл <sup>-1</sup>	Палочки (%)	Кокки (%)
1983 г.		14.9 *	72.3	27.7
1987 г.		12.4 *	73.4	26.6
20.05.97	1	4.0	41.0	59.0
	2	5.0	44.4	55.6
	3	3.4	50.4	49.6
	4	2.1	40.6	59.4
	5	4.1	42.9	57.1
20.06.97	1	2.0	58.7	41.3
	2	5.0	50.0	50.0
	3	2.3	57.2	42.8
	4	2.5	54.8	45.2
1.08.06	1	1.9	71.7	28.3
	2	1.7	69.4	30.6
17.05.13	1	1.84	44.3	55.7
	2	1.88	53.0	47.0
	3	1.29	52.0	48.0
	4	3.36	52.9	47.1
Лето 2013	1	$\frac{1.77-3.01}{2.32\pm 0.39}$	41.3 - 60.0	40.0 - 58.7
	2	$\frac{1.09-2.72}{2.08\pm 0.55}$	44.8 - 56.3	43.7 - 55.2
	3	$\frac{1.39-2.79}{2.06\pm 0.53}$	44.7 - 56.8	43.2 - 55.3
	4	$\frac{1.9-3.19}{2.64\pm 0.46}$	43.2 - 64.0	36.0 - 56.8
Осень 2013	1	$\frac{2.0-3.41}{2.49\pm 0.52}$	41.0 - 55.7	44.3 - 59.0
	2	$\frac{1.58-2.57}{2.08\pm 0.41}$	40.0 - 54.0	46.0 - 60.0
	3	$\frac{1.34-2.02}{1.63\pm 0.25}$	47.3 - 55.5	44.5 - 52.7
	4	$\frac{1.98-3.25}{2.62\pm 0.51}$	43.0 - 53.1	46.9 - 57.0
Зима 2013/ 2014	1	$\frac{2.15-3.0}{2.52\pm 0.36}$	41.0 - 59.5	40.5 - 59.0
	2	2.11	46.3	53.7
	3	-	-	-
	4	$\frac{2.0-2.63}{2.33\pm 0.26}$	44.8 - 54.2	45.8 - 55.2

Весна 2014	1	$\frac{2.17-4.64}{3.32\pm 0.98}$	49.6 – 73.7	26.3 – 50.4
	2	$\frac{2.07-2.79}{2.42\pm 0.29}$	61.2 – 73.7	26.3 – 38.8
	3	$\frac{1.97-2.23}{2.07\pm 0.12}$	56.7 – 69.4	30.6 – 43.3
	4	$\frac{2.33-3.0}{2.7\pm 0.28}$	60.5 – 71.9	28.1 – 39.5
Июнь 2014	1	$\frac{2.19-3.86}{3.03\pm 0.84}$	55.9 – 60.2	39.8 – 44.1
	2	$\frac{2.71-3.18}{2.95\pm 0.24}$	58.0 – 60.7	39.3 – 42.0
	3	$\frac{2.22-3.0}{2.61\pm 0.39}$	59.8 – 65.0	35.0 – 40.2
	4	$\frac{2.76-4.83}{4.05\pm 0.78}$	62.8 – 65.8	34.2 – 37.2
17.08.14	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
	4	4.12	58.6	41.4
19.10.14	1	2.19	53.5	46.5
	2	1.93	47	53
	3	2.09	55.5	44.5
	4	2.29	53.9	46.1
1.06.15	1	1.87	54.8	45.2
	2	1.67	62.7	37.3
	3	1.58	53.2	46.8
	4	1.94	60.6	39.4
20.07.16	1	7.26	63.0	37.0
	2	6.35	59.9	40.1
	3	5.16	56.9	43.1
	4	7.15	73.0	27.0

*Примечание:* \* - величины общей численности бактерий являются средними по 3-м станциям; «-» означает, что данные по станции отсутствуют. Над чертой указаны минимальные и максимальные величины, а под чертой – средние.

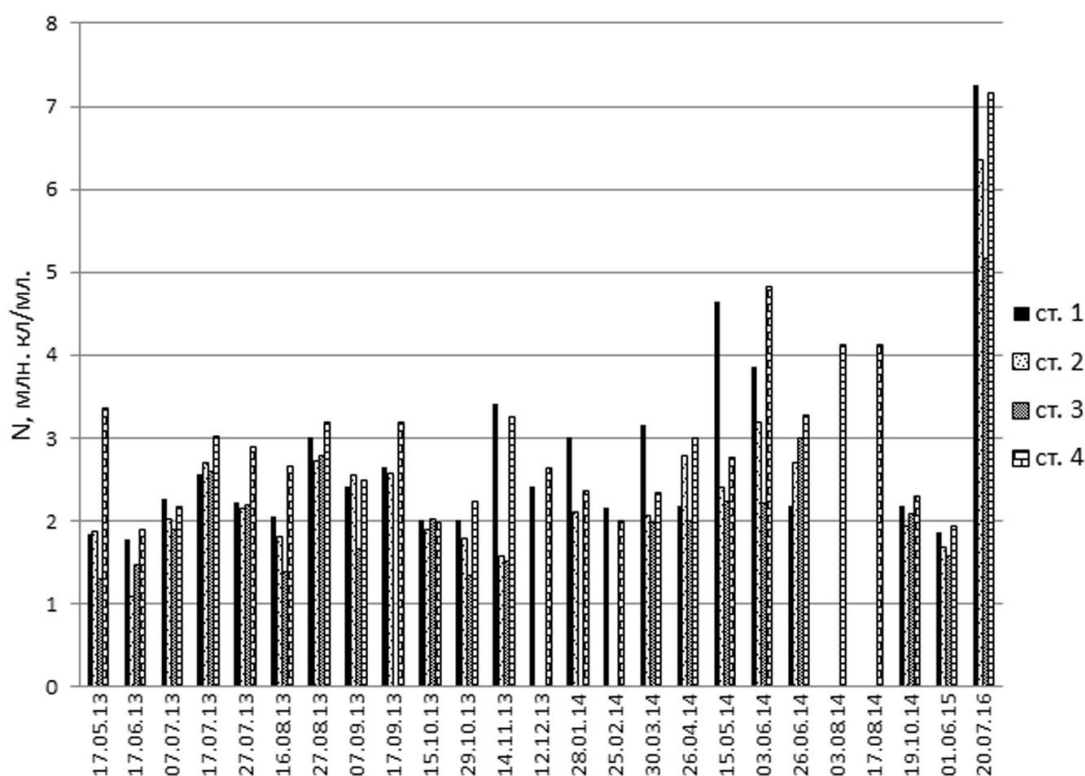


Рис. 2. Динамика численности ( $N$ ) бактериопланктона в Щучьем заливе в 2013-2016 гг.

За весь период наблюдений максимальное общее количество бактерий в Щучьем заливе ( $7.26 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ ) было зафиксировано 20 июля 2016 г. на ст. 1. Возможно, высокие величины численности бактериопланктона в это время могли быть связаны с интенсивным развитием фитопланктона и макрофитов, как источников легкоокисляемого органического вещества. Так, вся акватория залива в 2016 г. оказалась заросшей рдестом *Potamogeton perfoliatus* L. из-за низкого уровня воды. На этой станции 20 июля 2016 г., по данным автоматического многопараметрического зонда YSI 6600 V2-4, содержание хлорофилла было  $7.1 \text{ мкг/л}$ , а содержание групп фитопланктона, имеющих пигмент фикоцианин (Cyanophyta, Cryptophyta и др.), составляло  $2162 \text{ кл/мл}$ , что значительно больше, чем на этой же станции в другие даты отбора проб. Так, например, в конце июля 2013 г. концентрация хлорофилла составляла здесь  $4.5 \text{ мкг/л}$ , а количество фитопланктона – только  $366 \text{ кл/мл}$ . При этом, общая численность бактерий в это время была равна всего  $2.22 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ . Аномально высокие показатели численности фитопланктона (криptomonад) и концентрации хлорофилла наблюдались на этой станции 14 ноября 2013 г. перед ледоставом и 12 декабря 2013 г. уже подо льдом ( $15323$  и  $6024 \text{ кл/мл}$ ;  $26.6$  и  $9.9 \text{ мкг/л}$  соответственно). Однако, при этом не наблюдалось столь же резкого подъема численности бактериопланктона как в июле. Поэтому, вполне возможно, наряду с органическим веществом фитопланктона, причиной значительного роста бактериопланктона в июле 2016 г. является также эмиссия в воду органики, синтезированной макрофитами.

Высокие величины общей численности микроорганизмов наблюдались в середине июля ( $2.57 - 3.02 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ ) и в середине сентября ( $2.57 - 3.19 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ ) 2013 г. (рис. 2) что, скорее всего, связано с интенсивным развитием летних комплексов фитопланктона. В сентябре, по-видимому, происходит разрушение летнего комплекса фитопланктона, что сопровождается высвобождением значительного количества легкоокисляемого органического вещества. Биомасса фитопланктона 27 августа была достаточно высокой и составляла  $6.5 \text{ мг/л}$ . Значительное количество бактерий в Щучьем заливе зафиксировано и в начале июня 2014 г. -  $2.22 - 4.83 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ . Возможно, что весна 2014 г. была более поздняя, чем обычно и увеличение численности бактериопланктона может быть также связано с разрушением весеннего комплекса фитопланктона. По данным зонда YSI 6600 V2-4 концентрация хлорофилла составляла от  $5.7 \text{ мкг/л}$  до  $6.1 \text{ мкг/л}$ , а содержание фитопланктона –  $869 - 2011 \text{ кл/мл}$ .



В отдельные даты высокие величины общей численности микроорганизмов наблюдались при высокой температуре воды в заливе. Однако, рассмотрение зависимости численности бактериопланктона от температуры воды, как по отдельным станциям, так и при обобщении всех данных по 4-м станциям не позволяют говорить о значительно выраженной связи между численностью микроорганизмов в заливе и температурой. Наблюдается лишь слабая корреляция численности бактерий в воде с её температурой (рис. 3).

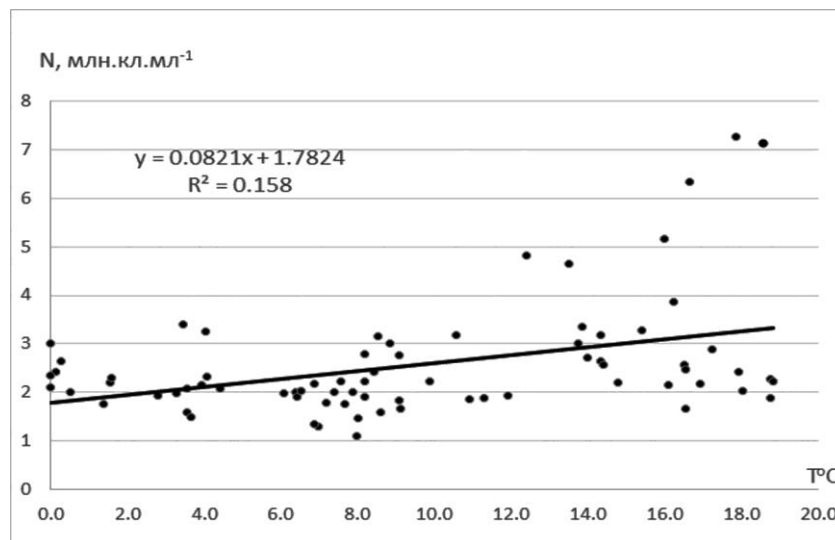


Рис. 3. Зависимость численности ( $N$ ) бактериопланктона в Щучьем заливе от температуры (Обобщенные данные по 4-м станциям за 2013-2016 гг.).

По-видимому, дополнительные факторы, связанные с функционированием других биотических сообществ (например, экзометаболиты фотосинтезирующих организмов), а также с воздействием антропогенного фактора (поступление в залив стоков) более важны для формирования уровня развития бактериопланктона в Щучьем заливе, чем температура.

Минимальные значения общей численности бактериопланктона на всех станциях отмечались в середине июня 2013 г. (1.09 – 1.9 млн. кл. мл<sup>-1</sup>) и начале июня 2015 г. (1.58 – 1.94 млн. кл. мл<sup>-1</sup>). В июне, в литоральной зоне Ладожского озера, обычно наблюдается снижение общего количества бактерий относительно майского, паводкового пика численности, т. е. наступает раннелетняя депрессия. Низкие концентрации бактерий наблюдались и в конце октября 2013 г. (от 1.34 до 2.23 млн. кл. мл<sup>-1</sup>), а также в октябре 2014 г. - 1.93 – 2.29 млн. кл. мл<sup>-1</sup>, что вполне нормально для осеннего периода (рис. 2).

Основная масса бактериопланктона была представлена палочковидными и кокковидными формами, иногда встречались нитевидные формы и спираиллы. Соотношение палочковидных и кокковидных морфологических типов бактериальных клеток является одним из показателей трофического статуса водоема. Преобладание палочковидных форм обычно косвенно свидетельствует о более высокой концентрации и низкой степени минерализации органического вещества в воде. Процентное соотношение палочковидных и кокковидных форм микроорганизмов уменьшилось со времени работы ЦБК с 73.4% до 54.8% в настоящее время. Судя по данным 2013-2016 гг. среднее значение процентного соотношения палочковидных и кокковидных форм бактерий укладывается в пределы, характерные для открытого озера (52.0 – 57.6%) [2]. Палочковидные формы существенно преобладали над кокковидными в пробах со станции 4, что может быть связано с расположением станции вблизи берега и поступлением большого количества аллохтонной микрофлоры и органических веществ с терригенным стоком. На этой же станции, в осенний период, встречались и спираиллы. Известно, что данные микроорганизмы наиболее часто встречаются в водоёмах с высоким содержанием органического вещества в воде [7]. Спираиллы, в небольшом количестве, практически на протяжении всего периода исследований встречались на станции 1 в сочетании с достаточно высоким содержанием палочковидных форм бактерий, что может косвенно

свидетельствовать о поступлении сюда загрязнённых органическим веществом вод из оз. Дроздово. Пробы воды со станций расположенных в центре залива и на выходе из него содержали меньшее количество палочковидных форм бактериальных клеток в сравнении со станциями 1 и 4. На этих станциях спириллы встречались крайне редко, что свидетельствует о более высоком качестве воды в центральной части и у выхода из залива.

По количеству бактериопланктона пресноводные водоемы классифицируются следующим образом: олиготрофный уровень  $< 1 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ , мезотрофный уровень -  $1-3 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$ , эвтрофный уровень  $> 2-3 \text{ млн. кл. мл}^{-1}$  [8, 9]. Результаты проведенных нами исследований свидетельствуют, что по мере снижения степени антропогенной нагрузки на Щучий залив Ладожского озера, судя по динамике общей численности микроорганизмов и изменению процентного соотношения различных морфотипов бактериальных клеток, качество воды залива с середины 2000 - х годов стало значительно выше, чем было в конце 80 – х и 90 – х годах прошлого столетия. Тенденция снижения общей численности бактериопланктона четко прослеживается на фоне уменьшения концентрации общего фосфора в воде залива. Трофический статус Щучьего залива в настоящее время является мезотрофно-эвтрофным.

*Благодарности:* за предоставление данных по биомассе фитопланктона авторы благодарят н.с. Протопопову Е. В. (ИНОЗ РАН), за информацию по содержанию общего фосфора в воде – н.с. Петрову Т. Н. (ИНОЗ РАН).

#### Литература:

1. Копылов А. И. Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем / отв. ред. Комов В. Т. / А. И. Копылов, Д. Б. Косолапов. – Ижевск: КнигоГранд. – 2011. – 322 с.
2. Капустина Л. Л. Бактериопланктон литоральной зоны Ладожского озера // кн.: Литоральная зона Ладожского озера / под ред. Е. А. Курашова. / Л. Л. Капустина. – СПб.: Нестор-История. – 2011. – С. 139 – 155.
3. Прибрежно-водные экотоны больших озёр /под ред. И. М. Распопова. СПб., 1998. – 54 с.
4. Александрова Д.Н. Бактериальные сообщества в озере // кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под редакцией Н. А. Петровой / Д.Н. Александрова, Л. Л. Капустина. – Ленинград: «Наука». – 1982. - С. 156 – 163.
5. Hobbie L. E. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy / L. E. Hobbie, R. I. Daley, S. Jasper. // Appl. and Environ. Microb. – 1977. - 33(5). – P. 1225 – 1228.
6. Игнатьева Н. В. Особенности гидрохимического режима прибрежной зоны озера // кн.: Литоральная зона Ладожского озера / под ред. Е. А. Курашова. / Н. В. Игнатьева, О. М. Сусарева. – СПб.: Нестор-История. – 2011. – С. 45 – 51.
7. Krieg N. R. Biology of the Chemoheterotrophic Spirilla / N. R. Krieg // Bacteriological reviews. – 1976. - Vol. 40, № 1. - p. 55-115.
8. Сорокин Ю. И. Бактериальная продукция в водоемах / Ю. И. Сорокин // Итоги науки и техники. Общая экология, биоценология, гидробиология. – 1973. – т. 1. – С. 47 – 101.
9. Копылов А.И. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоёмов / А.И. Копылов, Д.Б. Косолапов // кн.: Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. – СПб.: ЛЕМА. – 2007. – С. 176 –181.

**LONG-TERM POPULATION DYNAMICS OF BACTERIOPLANKTON IN THE SHCHUCHIY BAY OF LAKE LADOGA**

Galina G. Mitrukova,  
Ph.D., junior researcher, Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,

E-mail: galya-21@mail.ru;

Larisa L. Kapustina,

Ph.D., senior researcher,

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,

E-mail: larisa.kapustina@mail.ru;

Evgeny A. Kurashov,

Dr. Biol. Sci., Professor, Head of laboratory of Hydrobiology,

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,

E-mail: evgeny\_kurashov@mail.ru.

*Abstract:* Long-term microbiological studies (investigations) in the Shchuchiy Bay of Lake Ladoga especially detailed in 2013 - 2014 and in summer season 2015 – 2016 were carried out. The comparison of water quality of Shchuchiy Bay during different time periods and evaluation of the current trophic state of the Bay were made.

*Keywords:* Lake Ladoga, Shchuchiy Bay, bacterioplankton, microbial indicators, water quality

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ МИКРОПЕРИФИОНА В СКАЛЬНОЙ ЛИТОРАЛИ (НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА)

Иван Андреевич Мухин,  
к.б.н., доцент кафедры биологии и экологии  
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»  
E-mail: [iymukhin@mail.ru](mailto:iymukhin@mail.ru)  
Дина Сергеевна Дудакова  
к.б.н., научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ИНОЗ РАН  
E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)  
Михаил Олегович Дудаков  
инженер лаборатории комплексных проблем лимнологии  
ИНОЗ РАН  
E-mail: [mike814@yandex.ru](mailto:mike814@yandex.ru)

*Аннотация:* В работе обсуждается новый метод сбора микроорганизмов со скалистой литорали, являющейся типичным биотопом северной части Ладожского озера. Метод основан на аналогах, разработанных для мейобентоса и фитоперифитона, однако имеет существенные отличия от них. Данный подход был апробирован авторами в природных и лабораторных условиях и зарекомендовал себя как годный к применению. Однако обсуждаются и недостатки подхода, требующие дальнейшей работы.

*Ключевые слова:* микрозооперифитон, скальная литораль, пробоотборник

Зооперифитон является одной из важнейших, однако по-прежнему малоизученных частей водного сообщества. В особенности это относится к протозойной его составляющей. Несмотря на имеющиеся указания на большую роль микроорганизмов плёнок обрастаний в круговороте веществ и энергии в водных экосистемах, простейшие часто остаются за пределами поля зрения гидрoэкологии.

Микрозооперифитон занимает в экосистеме положение между бактерио- и фитопланктоном с одной стороны и мейобентосом и nekтоном с другой. Однако, помимо трофических связей с указанными группами он вступает в топические отношения различного характера с макрофитами и животными (поселяясь на их поверхности) и фитоперифитоном – конкурируя за площадь прикрепления. Указывается, что на простейших может приходиться до 30 и более процентов биомассы плёнки обрастания [1], они характеризуются также значительным таксономическим и экологическим разнообразием. Традиционно планктон и бентос в трофическом отношении связывали через двустворчатых моллюсков – фильтраторов, однако немецкие исследователи отмечают, что в отличие от последних, консументы биоплёнки показывают более динамичный отклик на изменение плотности и видового состава планктона [2]. Таким образом, налицо противоречие между высокой значимостью (и, по-видимому, всё ещё недооцененной) группы консументов – микрообрастателей в регуляции водных сообществ и её малой изученностью.

Одной из причин низкой представленности исследований роли микрозооперифитона в отечественной и зарубежной научной литературе является, по-видимому, сложность и неразработанность методических подходов к сбору материала в естественных условиях. Общепринятым на данный момент методом получения количественных данных о сообществах биоплёнки является использование модельных субстратов [3]. Несомненными преимуществами такого подхода являются возможность получения сопоставимых результатов, учёт фактора времени формирования обрастания, независимость от наличия или расположения естественных субстратов в водном объекте. Поскольку процессы колонизации в воде зависят от целого ряда факторов, таких как интенсивность света, глубина, скорость и характер течения, текстура

субстрата и других, распределение перифитона в водных объектах, как правило, неоднородно. Использование же искусственных субстратов может привести к снижению уровня этой изменчивости.

Однако исследования населения модельных субстратов позволяют лишь качественно оценить разнообразие перифитона в естественных местообитаниях, либо не дают представления о них вовсе. Кроме того, было показано, что состав и структура сообществ биопленки зависит от характера обрастаемой поверхности, а значит, сообщества модельных субстратов не могут в полной мере характеризовать экосистему водного объекта, для которого они не являются распространёнными или типовыми [4]. Использование стёкол обрастания не позволяет выявить зависимость и особенностей функционирования сообществ от типа архитектоники местообитания, поскольку организмы наблюдаются в типовых, абсолютно одинаковых условиях. Поэтому перифитологи приходят к мысли, что тщательный отбор проб с природных субстратов, вероятно, позволяет получить более полную информацию о структуре сообществ биоплёнки и особенностях трофических отношений.

Скальные биотопы составляют значительную часть литоральной зоны северного побережья Ладожского озера. Благодаря сложной структуре берега и обилию поверхностей обрастания, роль микроперифитона в шхерных районах особенно высока. В значительной степени недостатком методологии можно объяснить отсутствие в литературе данных по микрозооперифитону скальных местообитаний. Используемые в настоящее время в зоологических исследованиях техники не позволяют собирать животных в таких типах местообитаний. Соскоб скальпелем или бритвой не может быть применён в условиях, когда соскабливаемая поверхность постоянно находится в подвижной воде из-за риска потери значительной части материала.

Изучение разных групп, населяющих погруженные в воду субстраты, связано с различными методологическими подходами. И если методология для сбора микрозооперифитона разработаны недостаточно, то фитоперифитон и мейобентос со скальных поверхностей собирают успешно. Представляется актуальным рассмотреть методические подходы к сбору смежных с микроперифитонном экологических групп.

При сборе перифитона предполагается использовать метод, хорошо зарекомендовавший себя для мейобентоса, в основе которого лежит принцип всасывания. Количественные образцы перифитонных микроводорослей собирают из горных пород или других твердых, плоских поверхностей с устройством отбора проб перифитона NAWQA (SG-92) [5]. SG-92 представляет собой модифицированный пробоотборник-шприц, аналогичный тем, которые описаны Кушинг и др. (1983), Бриттон и Greenson (1988), и Aloï (1990). Это устройство сочетает в себе щётку для соскабливания (широко используемую и отечественными альгологами) и шприц. Такая конструкция позволяет соскабливать обрастания с поверхностей, которые не могут быть помещены в отдельную ёмкость. Перифитон отделяется от субстрата за счёт давления воды, создаваемого поршнем шприца и за счёт движения щетинок щётки. Аналогичным образом, но без использования щетки, действует модифицированный нами для сбора мейобентосных организмов пробоотборник Зуева [6]. В этом случае отрыв от субстрата производится за счёт создаваемого в приборе разреженного давления.

Учитывая мелкие размеры организмов и высокую прочность прикрепления их к субстрату, требуется изъятие с одной стороны небольшого слоя воды, непосредственно прилегающего к субстрату, а с другой – создание силы, которая срезала бы перифитон с твёрдого субстрата. Для решения этой задачи предлагается использовать шприц с насаженной иглой для инъекций диаметром 0.8 мм. Скошенная форма конца иглы и её небольшой диаметр позволяют плотно прижать устье к поверхности скалы. Острая кромка иглы, расположенная параллельно поверхности субстрата, выполняет функцию скальпеля, а поток воды, образованный разностью давлений (вследствие перемещения поршня), увлекает срезанные организмы.

Подсчёт организмов проводится в отобранном определённом объёме воды. При этом, в зависимости от целей исследования и изучаемой группы можно применять обычные техники для концентрирования организмов в пробе – например, с помощью фильтра. Мы в своих исследованиях отбирали для микроскопирования несколько проб из получившегося объёма пробы

(он составляет 5-6 мл). Определённая в результате нескольких просмотров небольших объёмов воды численность организмов пересчитывается сначала на объём воды пробы а затем – на площадь, с которой собирался образец.

Метод может быть модернизирован для сбора интегральной пробы с нескольких участков (последовательным прижиманием иглы шприца к разным участкам каменистого субстрата) или при использовании широкой стороны иглы как скребка, однако при таком способе работы погрешность может закрадываться в определении площади, с которой собирался материал. Отметим, что даже небольшая погрешность в расчёте площади соскабливания (вероятная в процессе работы в естественных условиях, особенно принимая во внимание, что речь идёт о прибрежной зоне крупного озера) приведёт к значительным искажениям результата, благодаря множественному пересчёту показателей на большие площади крупных камней или скал.

Описываемым способом микроорганизмы собирались в модельных и естественных условиях – в 2015 и 2016 гг. с каменистых субстратов, экспонировавшихся в аквариумах и с камней литорали северной части Ладожского озера. На тех же самых субстратах одновременно перифитон собирали соскабливанием скальпелем. Изучались преимущественно инфузории, представители других таксонов отмечались без определения. При расчёте численности прикрепленных и подвижных организмов результаты, полученные обсуждаемым пробоотборником, имеют тенденцию повышаться, по сравнению с теми, что получены традиционным соскабливанием. Мы связываем это с одной стороны с меньшими потерями материала, которые неизбежны при соскабливании камней, а с другой – приносом подвижных форм с соседних участков течением, возникающим при заборе пробы. Последнее менее значимо при изучении прикрепленных форм, но тем не менее требует дополнительных изысканий, которые позволят математически скорректировать получаемые результаты.

Обсуждаемый метод сбора простейших и других микроорганизмов перифитона (коловраток, мелких нематод, ракообразных и др.) позволит получить представления не только о качественном составе сообщества, но и соотношении видов. Нам представляется чрезвычайно важным создание методического обеспечения комплексных гидробиологических исследований, так как только они могут обеспечить системный подход к изучению водных экосистем, утвердившийся в современной экологии. Аналогия механизма сбора данных с альгологическими и зоологическими методиками открывает возможности для сопоставления результатов исследований зоологов и ботаников, специализирующихся на различных размерных группах обитателей субстрата, что чрезвычайно важно для понимания происходящих в сообществах процессах. Однако недостатком такого метода (как и практически любого другого) является возможность появления в пробе планктонных организмов. В ходе наших исследований в литорали Ладожского озера в 2016 г. в составе проб, отобранных обсуждаемым методом, неоднократно и в значительных количествах, отмечались ракообразные, типичные для планктона. Этот факт, впрочем, требует дополнительного изучения, так как указание на определённый вид, как «планктонный» не исключает его появление в слое обтекания субстрата.

Предлагаемый метод не является идеальным, в настоящее время проводятся лишь первые пробы, которые в принципе показывают его работоспособность. Необходимо проводить дальнейшие испытания воспроизводимости результатов при сравнении с классическими методиками и совершенствовать математический аппарат. Тем не менее, предлагаемое методическое направление представляется авторам перспективным, как открывающее исследователям возможность рассмотреть ранее неисследованные сообщества.

Литература:

26. Hosain E. Substrate based zooperiphyton communities and some physicochemical features of dhanmondi lake, Dhaka, Bangladesh/ E. Hosain, A. K. M. Nazrul Kabir, M. Niamul Naser // Bangladesh J. Zoology/ - 2013. - №41(1). – pp. 61-71
27. Kathol M., Contribution of biofilm- dwelling consumers to pelagic-benthic coupling in a large river / Kathol, M., Fischer, H., Weitere, M. // Freshw. Biol. – 2011. – №56. – Pp. 1017–1230
28. Жариков В. В. Состав фауны свободноживущих инфузорий Куйбышевского водохранилища / В.В. Жариков Ю. М. Ротарь // Биология внутренних вод: Информ. бюл. Л., 1992. – № 92. – с. 19-30.
29. Мухин И.А. Экологическая структура сообществ перифитонных инфузорий на различных субстратах в естественном и искусственном водотоках / И.А. Мухин // Вода: Химия и экология. 2013. – № 12. – С. 64-70.
30. Methods for collecting algal samples as part of THE NATIONAL WATER-QUALITY ASSESSMENT PROGRAM By Stephen D. Porter, Thomas F. Cuffney, Martin E. Gurtz, and Michael R. Meador U.S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report 93-409 Raleigh, North Carolina 1993
31. Зуев Ю.А., Зуева Н.В. Опыт исследования макрозообентоса каменистой литорали Ладожского озера // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 30. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2013. - С. 134-147

**NEW APPROACHES TO THE STUDY OF ROCKY INTERTIDAL ZONE  
MIKROPERIPHYTON (BY THE EXAMPLE OF LAKE LADOGA)**

Ivan Andreyevich Mukhin,  
PhD, assistant professor of biology and ecology  
Vologda State University  
E-mail: ivmukhin@mail.ru

Dina S. Dudakova  
PhD, researcher of laboratory of hydrobiology  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: judina-d@yandex.ru

Mikhail O. Dudakov  
Engineer of laboratory of complex problems of limnology  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: mike814@yandex.ru

*Abstract:* A new method for collecting microorganisms from the rocky intertidal zone is discussed. Rocky biotope is typical for the northern part of Lake Ladoga. The method is based on analogues designed for meiobenthos and phytoperiphyton, however, is quite different from them. This approach has been approved by the authors in natural and laboratory conditions. It has established itself as suitable for use. But it still has some disadvantages that require further work. The ways for their solving are discussed.

Keywords: mikrozooperiphyton, rocky intertidal, sampler

## КЛИМАТ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА: ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЯ

Лариса Евгеньевна Назарова  
к.г.н., заместитель директора по НИР  
ФГБУН Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН,  
E-mail: [nazarova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:nazarova@nwpi.krc.karelia.ru)

*Аннотация:* По данным метеорологических наблюдений рассматриваются изменение и изменчивость основных характеристик климата водосбора Онежского озера.

*Ключевые слова:* климат, Онежское озеро, температура воздуха, осадки

По данным многолетних метеорологических наблюдений на станциях сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных на исследуемой территории, рассматриваются изменение и изменчивость основных характеристик климата водосбора Онежского озера в течение XX – начале XXI веков.

Среднегодовая температура воздуха в районе исследований составляет от 1.5°C в г. Медвежьегорске до 2.7°C в Вытегре. На островах Онежского озера она повышается до 2.9-3.2°C. Начиная с 1989 г. наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха. Данная тенденция отмечена для всей территории Карелии [1,2,3]. Анализ данных многолетних наблюдений позволил сделать вывод, что норма средней годовой температуры воздуха в районе Онежского озера повысилась на 0.8-1.0°C по сравнению с периодом 1961–90 гг. Однако, хотя температура воздуха в течение последних 20 лет превышает климатическую норму, дальнейший ее рост не наблюдается (рис.1).

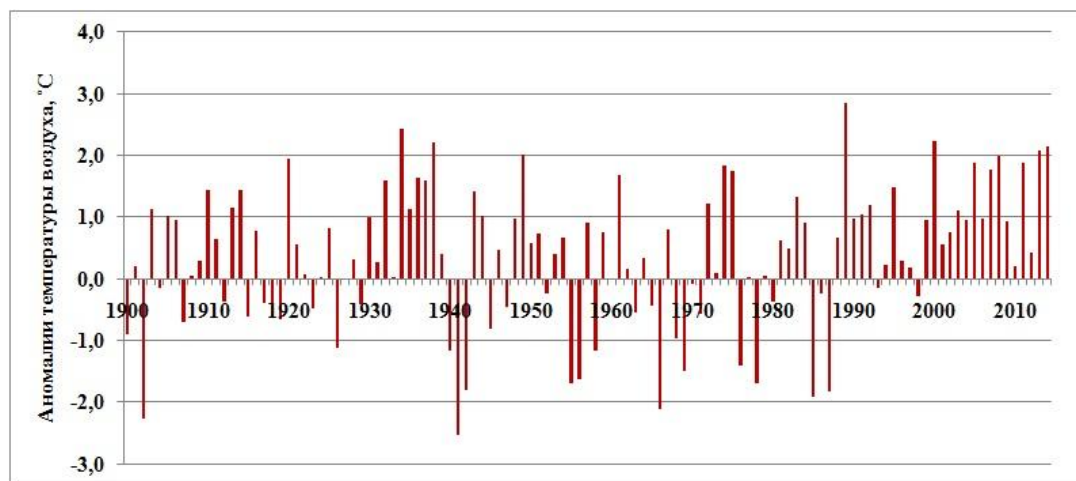


Рис.1. Отклонения средней годовой температуры воздуха от климатической нормы (1961–90 гг.), °С, МС Петрозаводск.

Значения средней месячной температуры воздуха также превышают норму. Наибольшие значимые изменения температуры характерны для зимних месяцев, особенно для января (повышение на 2.5 - 3.5°C). Повсеместно отмечено сокращение числа дней с морозом. Повышение температуры воздуха в зимние месяцы было вызвано увеличением повторяемости циклонического характера погоды, о чем свидетельствуют данные наблюдений за атмосферным давлением. Именно в период с декабря по март атмосферное давление было значительно ниже климатической нормы. Циклоны, образовавшиеся над Атлантикой, зимой обуславливают наступление относительно теплой погоды с часто повторяющимися оттепелями. В районе Онежского озера число дней с оттепелями (когда максимальная суточная температура воздуха была выше 0°C)



возросло в начале XXI века на 15-20 дней. Несмотря на общий повышенный фон температуры воздуха в районе исследований, понижения температуры ниже  $-25.0...-30.0^{\circ}\text{C}$  отмечаются практически ежегодно.

Одновременно с изменениями в режиме температуры воздуха в районе исследований отмечается повышение температуры почвы. Анализ данных наблюдений по вытяжным термометрам под естественным покровом на глубинах от 20 до 320 см показал, что в течение последних двух десятков лет годовая температура почвы на различных глубинах до 320 см на территории Карелии превышала климатическую норму. В южных районах республики аномалии составляли  $1.0-1.5^{\circ}\text{C}$ .

Изменения в температурном режиме района исследований привели к смещению дат наступления климатических сезонов года. В течение последних двух десятилетий весенний сезон наступал на 7–10 дней раньше средних многолетних значений. Даты наступления летнего сезона на  $\pm 5$  дней колебались около средней многолетней даты перехода температуры воздуха через  $10^{\circ}\text{C}$ . Дата начала осеннего сезона отличалась от климатической нормы на 10–15 дней, за счет чего была увеличена продолжительность летнего сезона года. Даты наступления холодного периода года были смещены на более поздние сроки примерно на неделю. В результате наблюдавшихся отклонений дат устойчивого перехода температуры воздуха, через  $0^{\circ}\text{C}$  средняя за указанный отрезок времени продолжительность теплого периода года составила 215–225 дней вместо 192–210 дней по климатической норме [3].

В среднем за год на территории Карелии, относящейся к зоне избыточного увлажнения, выпадает 550-750 мм осадков. Годовое их количество возрастает в направлении с севера на юг. Однако на распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и характер подстилающей поверхности, ведущие к нарушению плавного хода изменения количества осадков. Довольно заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов, таких, как Белое море, озера Ладожское, Онежское, Топозеро, Пяозеро и т.д.

Внутри года количество выпадающих осадков распределено неравномерно. В теплый период (май–октябрь) их выпадает до 400мм. Наибольших значений количество выпавших осадков достигает в летние месяцы — июль и август, а также в сентябре.

Анализ изменений количества осадков в районе исследований показывает, что в целом наблюдается рост годовых сумм выпавших атмосферных осадков, средние многолетние значения за 1991-2015 годы превышают климатические нормы на 12-60 мм (рис.2). Отмечено увеличение осадков как теплого, так и холодного периода года. Увеличение годовых сумм осадков привело к изменению средних многолетних значений, рассчитанных за продолжительные периоды. Средние за 1991-2015 гг. годовые суммы превышают климатические нормы на 20-60 мм.

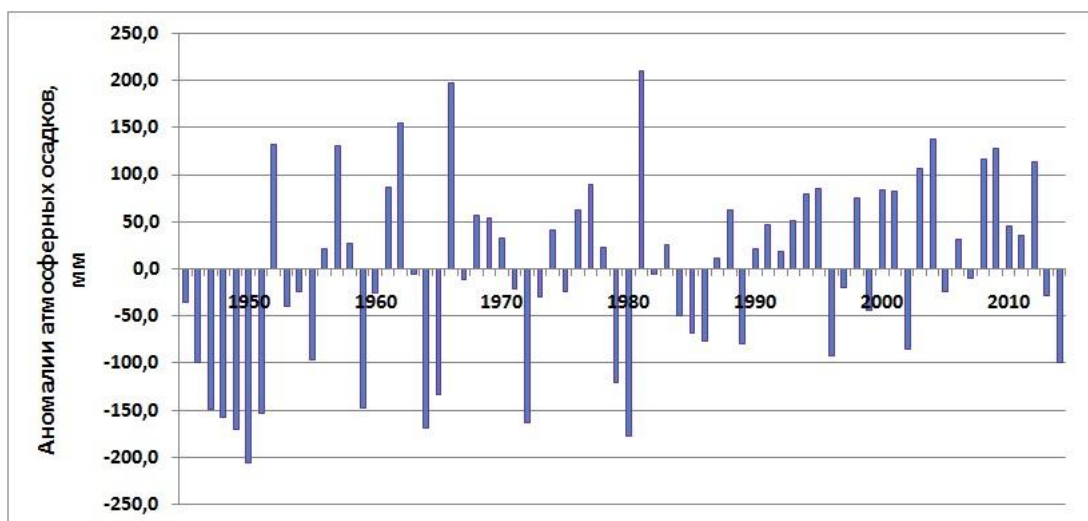


Рис.2. Отклонения годовых сумм атмосферных осадков (мм) от климатической нормы (1961–90 гг.), МС Петрозаводск.

При изучении изменений и изменчивости климата важной частью является учет интенсивности, частоты и продолжительности выпадения атмосферных осадков. Общее число дней с осадками более 0.1 мм в районе Онежского озера составляет 180–200 за год. Наибольшее число дней с осадками отмечается в холодный период года – с октября по февраль (до 20-25 дней за месяц), но число дней с сильными (10,0 мм и более) осадками в это время года не велико – менее 1 дня за месяц. В течение весны и летнего сезона общее число дней с осадками уменьшается до 13-18, но возрастает число дней с осадками более 1,0 и 5,0 мм за день, хотя продолжительность выпадения осадков за сутки обычно не велика.

При анализе многолетних данных о числе дней с осадками можно сделать следующие выводы. В течение 1995–2014 гг. общее число дней с осадками 0.1 мм и более в основном было ниже нормы или соответствовало ей. Общее число дней с осадками не увеличилось, однако возросла интенсивность выпадения осадков. Так, число дней с сильными осадками 10 и более мм часто превышает климатическую норму [4].

Особый интерес вызывают возможные изменения в режиме снежного покрова в свете повышения температуры воздуха. Сравнение данных наблюдений в течение 1995–2015 гг. с климатической нормой позволяет сделать вывод, что в указанный период число дней со снежным покровом было несколько ниже средних многолетних значений (153–155 дней) [5].

#### Литература:

1. Назарова Л.Е. Многолетние изменения температуры воздуха в Карелии // География и природные ресурсы.- 2008.- № 3. - С. 75–79.
2. Назарова Л.Е. Особенности динамики температурного режима Карелии // География и природные ресурсы.- 2012.- № 4. - С. 170–174.
3. Назарова Л.Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия РГО. -2014. -Т. 146, вып. 4. - С. 39–45.
4. Назарова Л.Е. Атмосферные осадки в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН, №9, Серия Лимнология.- 2015. - С.114-121.
5. Назарова Л.Е. Современное состояние и изменчивость климата на водосборах Онежского озера и Выгозерско-Ондского водохранилища // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 10-20.

## CLIMATE OVER THE CATCMENT AREA OF LAKE ONEGO: VARIABILITY AND CHANGES

Larisa E. Nazarova  
Vice-director, scientific affairs  
Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
E-mail: [nazarova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:nazarova@nwpi.krc.karelia.ru)

*Abstract:* The article considers the data of meteorological observations. Shows the change and variability of the main climate characteristics of the catchment area of lake Onego.

*Keywords:* climate, lake Onega, air temperature, precipitation

## ИТОГИ ТЕРМИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Михаил Арсеньевич Науменко,  
д.г.н., заведующий Лаборатории гидрологии  
ИНОЗ РАН

e-mail: naumenko@limno.org.ru

Вадим Викторович Гузиватый,  
к.г.н., старший научный сотрудник Лаборатории гидрологии  
ИНОЗ РАН

Сергей Германович Каретников,  
к.г.н., старший научный сотрудник Лаборатории гидрологии,  
ИНОЗ РАН

Александр Михайлович Крючков,  
инженер Лаборатории гидрологии  
ИНОЗ РАН

*Аннотация:* В докладе представлены итоги термических и ледовых исследований Ладожского озера, выполненные в Лаборатории гидрологии ИНОЗ РАН за последние 15 лет. Рассматриваются аномальные распределения температуры поверхности воды, климатические тренды, ледовые условия.

*Ключевые слова:* термическая структура Ладожского озера, пространственные аномалии, ледовые условия

Распределение температуры воды по акватории крупного озера и по вертикали от поверхности до дна является одной из важнейших абиотических характеристик озера. Изучение динамики поля температуры в крупном озере даёт физическую основу для понимания ряда химических и биологических процессов. Тепловой режим воды крупных озёр умеренной климатической зоны может претерпеть изменения при возможном повышении (понижении) температуры воздуха на Земле в будущем. Изменения должны произойти не только в температуре верхнего перемешанного слоя воды и воздуха над ним, но и в сезонной вертикальной термической структуре и ледовом режиме.

В докладе представлены итоги термических и ледовых исследований Ладожского озера, выполненные в Лаборатории гидрологии Института озероведения РАН за последние 15 лет.

В крупных озёрах в силу больших размеров и разнообразия глубин необходимо проводить районирование их акватории, выделяя районы, где лимнические процессы имеют одинаковую направленность. В зависимости от глубины и объёма вод лимнических районов, характеристики которых обсуждаются в [1], теплосодержание изменяется как по сезонам, так и по акватории озера [2]. Крупнейшее в Европе Ладожское озеро (с площадью 17 872 км<sup>2</sup>) было разбито на шесть районов: 1) мелководный с глубинами 0-18 м, 2) переходный – 18-50 м, 3) район озёрного уступа – 18-50 м, 4) склоновый – 50-70 м, 5) глубоководный – 70-100 м, 6) впадины – 140-230 м.

Теплосодержание водной массы озера является важнейшей характеристикой взаимодействия поверхности озера с атмосферой, определяет способность озера накапливать тепло и является необходимым показателем при исследовании климатических изменений.

Созданная в Институте озероведения РАН база данных по Ладожскому озеру позволила провести статистически обоснованные исследования пространственных термических структур озера в течение годового цикла [2, 3]. Она включает в себя более 250 тыс. измерений температуры воды за период с 1898 по настоящее время. Произведена оценка вариации температуры воды и теплосодержания водной толщи Ладожского озера для лет с аномально высокими и аномально низкими температурами воды на основе термической базы данных. За

аномально высокие температуры были приняты температуры воды, превышающие 75 % квантили выборки, а аномально низкими температуры соответственно – 25 % квантили [4].

Ретроспективный анализ длительных наблюдений позволяет сделать выводы о будущих возможных изменениях в термическом режиме Ладожского озера. С использованием цифровой морфометрической модели озера был выполнен расчёт теплосодержания для слоёв толщиной 5 м с учётом плотности озёрной воды и объёма каждой лимнической зоны.

В течение года при средних условиях в Ладожском озере приблизительно поровну идёт тепла на нагревание при свободной конвекции (46%) и при устойчивой стратификации (54%). В экстремально тёплый год процесс свободной конвекции весной заканчивается раньше, и далее большее количество приходящего тепла идёт на увеличение температуры водной массы озера в условиях устойчивой стратификации. В аномально холодный год ледовые явления на озере продолжаются гораздо дольше средних (на 1-2 месяца) и требуется большое количество тепла на нагревание озера до температуры наибольшей плотности и только после этого озеро нагревается в условиях устойчивой стратификации.

В августе-сентябре абсолютная разность между средним и квантильным значением теплосодержания может превышать наименьший в году теплосодержание (21\*10<sup>17</sup> Дж).

Вычисленные средние годовые значения температуры водной массы всего озера и его лимнических районов представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

*Средние годовые значения температуры воды всего озера и его лимнических районов*

Горизонт		Лимнические районы						Все озеро
		I 0-18 м	II 18-50 м	III 50-70 м	IV 70-100 м	V 100 - 140 м	VI 140 - 230 м	
0 м		6.0	5.7	5.2	4.9	4.9	5.1	5.5
20 м		--	4.0	3.7	3.7	3.6	3.9	3.8
50 м		--	3.2	3.1	3.0	3.1	3.3	3.1
Водная масса озера	75% квантиль	6.9	5,2	4,1	3,9	3,9	3,9	4,4
	средняя	5.6	4,4	3.6	3.4	3.4	3.5	3,8
	25% квантиль	4.7	3,7	3,2	2,9	3,1	3,1	3,3

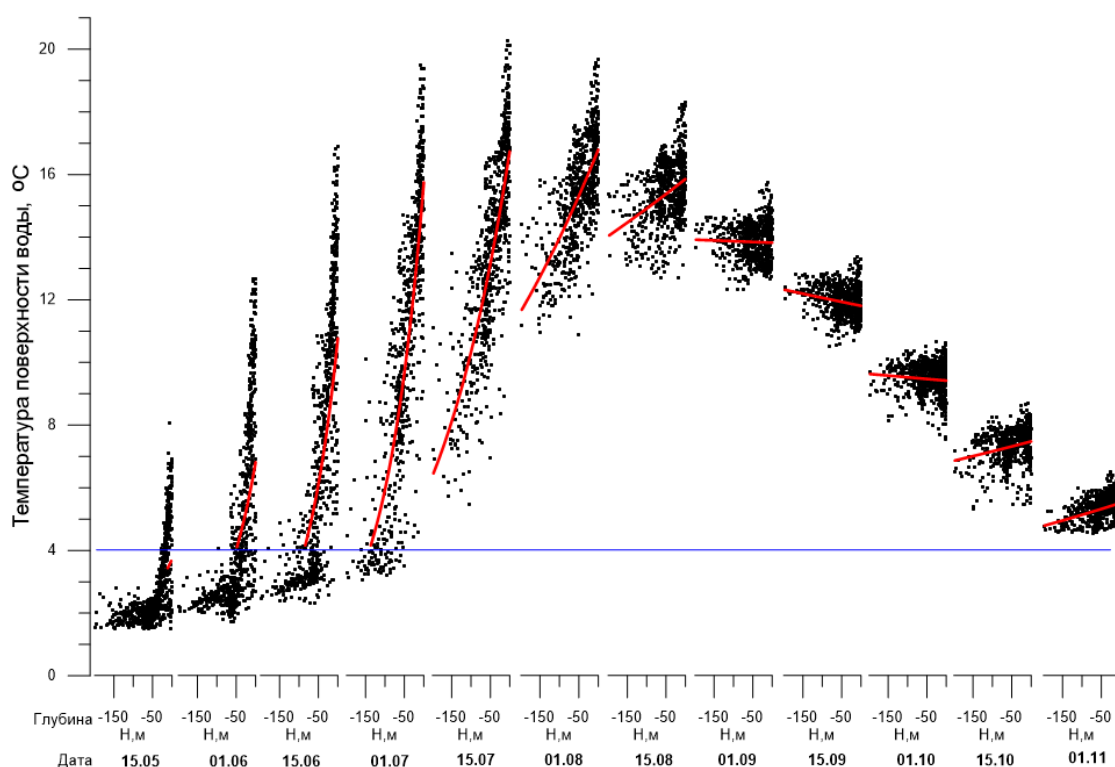
На рис. 1 показан годовой ход средней климатической температуры поверхности Ладожского озера. Отчётливо прослеживается различия в нагревании водной толщи в зависимости от распределения глубин и даты. Сезонный ход температуры поверхности озера асимметричен. Очевидно, что мелководные районы прогреваются быстрее глубоководных, именно в них наблюдается максимальная температура поверхности озера. Глубоководные районы более инертны и в них максимальная температура наступает с запаздыванием в месяц и не превышает 13°C.

Величины, характеризующие возможные отклонения теплосодержания от среднего, указывают, что наибольшие относительные изменения могут иметь место в осенне-зимний период, достигая 70-90 % в декабре–январе.

Для аномально тёплого года в центральной части Ладоги температура воды района озёрного уступа будет выше 4°C, что не бывает при средних климатических условиях. В более глубоководных районах вариации температуры не значительны, особенно при температуре менее 4°C.

Возможные колебания (отклонения от среднего) в теплосодержании и температуре водной толщи лимнических районов составляют до 40% и 3-4°C для мелководного прибрежного района. Такие большие величины могут иметь место в период максимального прогрева в июле-августе. Чем больше глубина лимнического района, тем меньше возможные колебания в теплосодержании и температуре его водной толщи. Для наиболее глубоководного района в течение года максимальные отклонения от средней величины температуры воды не превышают 1°C.

Существенные различия в вертикальной структуре температуры воды выявлены между теплыми и холодными годами. В основном изменения температуры воды имеют место в поверхностном слое, тогда как на глубине



*Рис. 1. Сезонный ход пространственного распределения температуры поверхности воды при средних климатических условиях.*

ниже слоя скачка (50 м), температура воды практически не реагирует на изменения поверхностной температуры. Увеличение температуры поверхности воды приводит к увеличению вертикальных градиентов температуры в слое скачка и, следовательно, устойчивости водной толщи в теплый год. Это усиливает блокирующую роль слоя скачка и затрудняет обмен с нижележащими слоями.

При прочих равных условиях в теплый год в период охлаждения осенью поверхности воды интенсивность свободной конвекции может уменьшаться и, следовательно, увеличиваться период стратификации.

Самые большие термические изменения как в аномально теплый, так и в аномально холодный годы, будут происходить в прибрежном мелководном районе Ладожского озера. Глубоководные районы даже при экстремально возможных изменениях значительно не изменяют своё термическое состояние в силу своей огромной тепловой инерции.

Средние (фоновые) пространственные распределения температуры воды определяются морфометрией водоёма, физико-географическими и климатическими условиями. Реальные поля температуры крупных водоёмов формируются под воздействием многих физических процессов, имеющих разную природу, их можно рассматривать как совокупность температурных неоднородностей различных пространственно-временных масштабов. Неверная оценка характера изменчивости температурных полей и недоучёт их неоднородности может привести к ошибочной

трактовке количественных и качественных параметров термического режима, особенно в условиях изменяющегося климата. Представляет несомненный интерес оценить характер пространственно-временной аномальности реальных температурных полей поверхности Ладожского озера, а именно определить величины отклонений реальных пространственных температурных полей от типичных фоновых и площадей ими занимаемых [5].

Для каждого месяца были получены значения площадей зон с отклонениями температуры в пределах  $\pm 5,5$  °С, так как отклонения редко превышают эту величину. В среднем около 2 % акватории может иметь температуру на 5°С ниже типичной, и 4% - на 5°С выше таковой. Максимально до 18 % общей площади озера может быть перегрето на 5°С, и 8 % - быть на 5°С холоднее типичного состояния. Следует отметить, что эти наиболее аномальные ситуации наблюдались в июле, месяце, характеризующемся наибольшей изменчивостью температурных полей, когда температура поверхности воды ещё не достигла наивысших в году значений.

Оценивая интенсивность аномалий в величинах, равных одному стандартному отклонению, мы получили, что площади, занимаемые аномалиями, превышающими эту величину, могут изменяться от 4% до 91% акватории в зависимости от сезона. Так, например, в июне такие аномалии в среднем занимают 17 % поверхности и 43 % максимально, в осенние месяцы - бóльшие площади.

Преобладающим является интервал отклонений температуры + 0,5°С...+ 1,5°С, положительные аномалии температуры преобладают над отрицательными. Период максимального прогрева поверхности воды Ладожского озера (конец июля – начало августа) совпадает с периодом наибольшего перегрева поверхности озера что подтверждает вывод о положительном климатическом тренде температуры поверхности Ладожского озера в первой половине августа [6].

Анализ показал, что наиболее аномальным распределением температуры поверхности характеризуется прибрежный мелководный район, обладающий минимальной тепловой инерцией. Это зона трансформации воздушных и водных масс, где наблюдаются бризы и сгонно-нагонные явления, сопровождающиеся апвеллингами и даунвеллингами. Здесь отклонения реальной температуры от типичной могут превышать 5°С.

Над значительными глубинами центральной Ладоги, наиболее теплоинертной, в период гидрологической весны отклонения не превышают  $|1,0|$ °С. Это обусловлено существованием термического бара, препятствующего обмену водных масс, разграниченных им. Однако, после разрушения термобара, в период гидрологического лета, аномальность глубоководного района увеличивается.

Для оценки климатических трендов температуры поверхности воды Ладожского озера был подготовлен массив данных для глубоководного района с глубинами от 92 до 140 метров. Измерения температуры поверхности центральной части Ладожского озера (60-61.5°N, 30-33 °E) были выполнены с судов Гидрометеослужбы и ИНОЗ РАН за период с 1956 г. по 2003 г. Для указанного периода были проведены расчеты линейных трендов температуры воды и анализ их статистической значимости при изменении масштабов осреднения в интервале от 1 до 20 суток и сдвигом 1 сутки [6]. Для периода с мая по ноябрь можно выделить лишь четыре интервала общей продолжительностью около 4-х декад, когда существуют значимые тренды, т.е. для более 80% общего периода открытой воды трендов в температуре поверхности воды не обнаружено.

Наибольший коэффициент детерминации, описывающий 30-40% общей изменчивости, достигается при масштабе осреднения от 4 до 8 суток (синоптический период). При большем масштабе осреднения (до 15-20 суток) коэффициент детерминации уменьшается до 10-15% при общем увеличении интервала со значимыми трендами температуры.

Средняя величина тренда температуры воды в центральной глубоководной части озера в общем не зависит от периода осреднения (не превышающего 20 суток), положительна и составляет 0.05-0.07°/год

Термическая весенняя фронтальная зона (термобар) существует в Ладожском озере ежегодно с мая по начало июля. Современный взгляд на процессы, происходящие во фронтальной зоне крупных озёр, требует проведения специализированных наблюдений для изучения пространственно-временной изменчивости в масштабах синоптического периода. Первые такие

наблюдения в Ладожском озере были проведены в конце прошлого века. Подспутниковый эксперимент “Термобар-2010” [7]. был направлен на проведение двух последовательных съёмок с измерением гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров в зоне взаимодействия стратифицированных и квазиизотермических вод (фронтальной зоне). Эти измерения позволили проследить скорость движения фронта и трансформацию лимнических процессов во фронтальной зоне, особенно на приповерхностных и придонных горизонтах. Работы проводились на небольшом расстоянии от восточного берега Ладожского озера на полигоне размером 25×25 км с координатами центра: 61°05'с.ш., 32°20' в.д. 26 мая и 30 мая 2010 г. В пределах выбранного полигона глубины равномерно изменялись от уреза воды до 70 м. Измерения проводились на пяти разрезах с расстоянием между станциями 3-4 км зондом фирмы “Sea&Sun Technology” и вертикальным разрешением 10 см. На станциях измерялись прозрачность воды и сопутствующие гидрометеорологические параметры.

Отбор проб воды на гидрохимические и гидробиологические параметры проводился на выборочных станциях на трех горизонтах: поверхность, 10-15 м, и придонном 2-3 м от дна. Буксировка датчика температуры на разрезах в приповерхностном слое на глубине примерно 0.3-0.4 м позволила получить пространственные ряды с дискретностью 1 м во время первой съёмки 25 тыс., во время второй - 21 тыс. измерений.

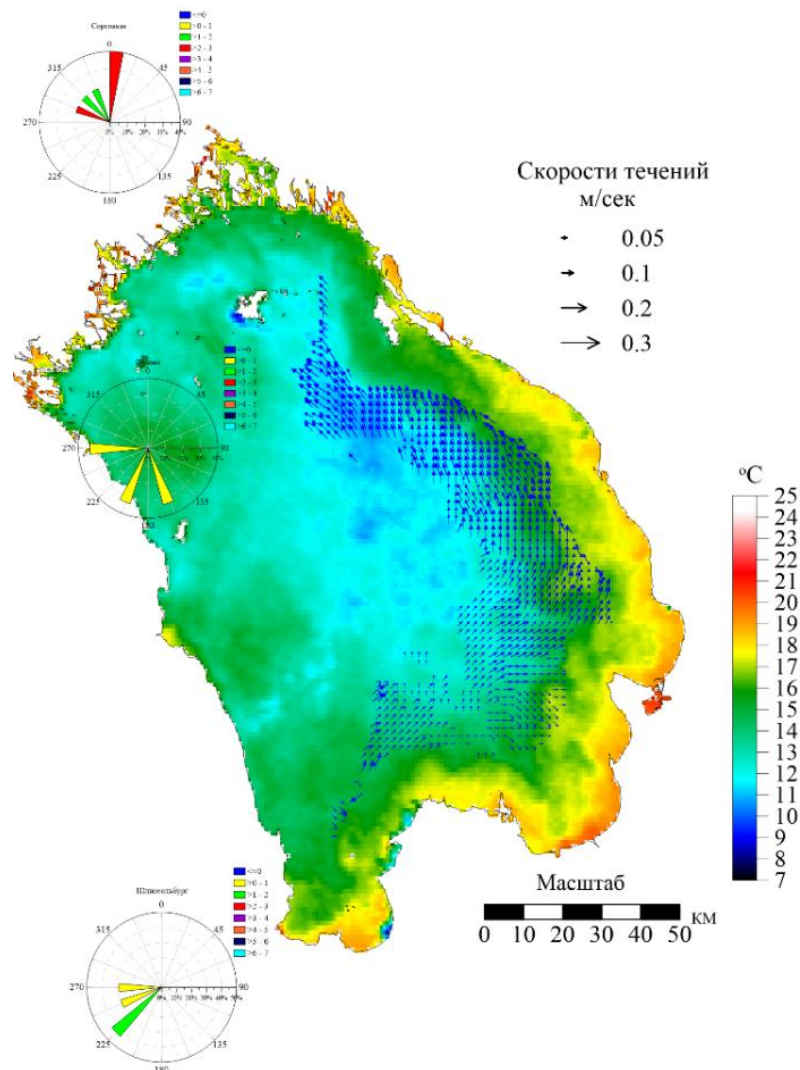
Спутниковая инфракрасная информация со спутников NOAA и LANDSAT позволила определить район исследований и синхронно исследовать проявления термических нерегулярностей на поверхности полигона.

Динамика вод Ладожского озера во многом определяет пространственное распределение химических элементов, гидробионтов, трансформацию и перенос вод, механизмы самоочищения. Развитие спутникового дистанционного зондирования водных объектов позволяет получить новые знания о термической структуре, течениях и циркуляции вод в крупном озере.

Оценка течений со спутников в настоящее время осуществляются несколькими методами, одним из них является метод максимальной кросс-корреляции (Maximum Cross-Correlation-MCC), разработанный W Emery [8].

Метод MCC представляет собой процедуру, которая вычисляет смещение небольших областей одного изображения относительно другого. Этот метод основан на расчете полей адвективных течений на поверхности воды, исходя из смещения термической полей, видимой в паре спутниковых ИК изображений одного и того же участка поверхности воды, произведенных через 2-6 часов. Он используется в настоящее время для открытого океана, прибрежных районов, внутренних морей и озера Тахо [9].





*Рис. 2. Поверхностные течения, рассчитанные на основании двух последовательных снимков 3 июля 2010 года.*

Характерным примером, показывающим распределение течений в период нагревания с учетом воздействия поля ветра, может служить рисунок 2. Основой для расчетов послужила два изображения поверхности Ладожского озера в ИК диапазоне, полученных со спутника Terra в 6 часов 54 минуты и 9 часов 16 минут 3 июля 2010 года. Промежуток времени между изображениями составляет 2 часа 22 минуты.

На представленном ИК изображении поверхности воды Ладожского озера хорошо видны зоны повышенной температуры в районе восточного побережья и впадения рек Бурная, Волхов и Свирь. Зона повышенных температурных градиентов проходит вдоль всего южного и восточного берега. Если в центре озера температура примерно равна 11°C, то на восточном побережье достигает 17-19°C. Векторы показывают поле течений, рассчитанное методом МСС. Основные поверхностные потоки наблюдаются как раз в зоне повышенных градиентов. Причем, направление векторов течений в целом согласуется с направлением ветра, который наблюдался в этот период над Ладожским озером.

Оценивая погрешность метода, можно указать, что примерно 60% направлений между наблюдаемыми и рассчитанными значениями векторов имеют отклонения всего  $\pm 5$  градусов. Около 6% составляют максимальные отклонения - достигающие  $\pm 20$  градусов. Рассчитанные скорости поверхностных течений методом максимальной кросс-корреляции, имеют тенденцию к завышению по сравнению с реальными в среднем на 6 см/сек.



Ледовый режим крупнейшего в Европе озера – Ладожского представляет значительный интерес как с практической точки зрения (судоходство, рыболовство, рекреационные условия), так и с точки зрения фундаментального понимания взаимодействия озера, атмосферы и прилегающей суши. В среднем на озере отмечаются ледовые явления в течение  $172 \pm 3$  суток [10]. Известно, что ледовый режим озера может служить хорошим индикатором изменения климата. Общее усиление (или ослабление) интенсивности циркуляции атмосферы в планетарном масштабе проявляется в региональных особенностях изменения климата и естественной климатической изменчивости, в частности на ледовом режиме Ладожского озера.

Многолетние тренды различных ледовых характеристик были оценены ранее, их вклад невелик и составляет не более 3-5% общей дисперсии процесса [10].

Более полугод (с начала ноября по конец мая) на поверхности воды Ладожского озера могут наблюдаться ледовые явления. Пространственная неоднородность ледового состояния крупного озера обусловлена в основном разнообразным распределением глубин и определяется региональными характеристиками суровости зимы. Информация с космических аппаратов серии NOAA и MODIS была использована для изучения ледовых условий в Ладожском озере. В специализированной базе данных содержится более 1300 съемок за период с 1943 по 2010 г.г. На основе 65-летнего ряда наблюдений за ледовым покрытием Ладожского озера были построены хронологические графики изменения ледовитости озера и соответствующие ей необходимые суммы отрицательных градусо-дней по станции Сортавала. По продолжительности полного покрытия льдом Ладожского озера были выделены аномально холодные годы, годы более чем 90 суточным полным покрытием акватории льдом, – 1955-56, 1959-60, 1965-66, 1984-85, 1986-87. Аномально теплые годы (ледовое покрытие не превышало 70% акватории) – 1960-61, 1988-89, 1991-92, 1994-95, 2007-08 [11]. Четыре зимы подряд с 2013 -2016 г.г. Ладожское озеро не замерзало полностью, что произошло впервые за период дистанционных наблюдений.

Представленные в настоящей презентации результаты изучения термических и ледовых процессов Ладожского озера подводят итог многолетних исследований и позволяют сформулировать перспективные направления.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-55-76025 “Евразийские озёра в экстремальных климатических условиях”.

#### Литература:

1. Науменко М. А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера. Доклады РАН, т.345, № 4, 1995, С.514-517.
2. Науменко М. А., Каретников С. Г., Гузиватый В. В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера. Доклады РАН, 2000, т.373, № 2, С. 247-250
3. Науменко М. А., Каретников С. Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией. Доклады Академии Наук, 2002, т.386, № 2, С. 250-253
4. Науменко М. А., Гузиватый В. В. Климатические вариации температурного режима Ладожского озера для периода открытой воды. Региональная экология, 2010, 3(29). С. 104-108
5. Науменко М. А., Тимофеева Л. А. Аномалии полей температуры поверхности воды Ладожского озера синоптических масштабов. Метеорология и гидрология, 2009. № 12, С.77-85.
6. Науменко М. А., Гузиватый В. В., Каретников С. Г. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период. Доклады Академии наук. 2006. т.408, №5. С. 675-678
7. Науменко М. А., Гузиватый В. В., Каретников С. Г., Петрова Т. Н., Протопопова Е. В., Крючков А. М. Натурный эксперимент ”Термический фронт-Ладога-2010”. Доклады Академии наук. 2012, вып. 444, № 1, С. 83–87.
8. Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J., Crawford W. R. Mackas D. L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. J. Geophys. Res. 91, C11, 1986, pp. 12865–12878.

9. Zavialov P. O., Grigorieva J. V., Moeller Jr. O., Kostianoy A. G., Gregoire M., Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique, J. Geophys. Res., v. 107, c. 10, 2002, pp. 3160-3178

10. Karetnikov S., Naumenko M., 2008. Recent trends in Lake Ladoga ice cover. Hydrobiologia, 599. pp. 41-48

11. Karetnikov S., Naumenko M., 2008. Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years. Hydrological processes, 2011, 25, pp. 2859-2867.

## **THE RESULTS OF THE THERMAL AND ICE STUDIES OF LAKE LADOGA IN THE EARLY TWENTY FIRST CENTURY**

Mikhail Naumenko

Dr. of Geography, Head of Hydrology Laboratory of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
e-mail: naumenko@limno.org.ru

Vadim Guzivaty

Cand . of Geography

Senior Scientist , Hydrology Laboratory of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

Sergey Karetnikov

Cand of Geography, Senior Scientist, Hydrology Laboratory of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

Alexandr Kruchkov,

Engineer of Hydrology Laboratory of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

*Abstract:* The report presents the results of the thermal and ice studies of Lake Ladoga, performed in the Hydrology Laboratory of Limnology Institute of Russian Academy of Sciences over the past 15 years. The anomalous distribution of surface temperature examines as well as climatic trends and ice conditions.

*Keywords:* lake thermal structure, spatial anomalies, ice conditions, Lake Ladoga

## ГИДРОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Николай Аркадьевич Нестеров,  
д.т.н., профессор, заведующий лабораторией  
географии и природопользования ИНОЗ РАН.

e-mail: NNesterovmail@yandex.ru

Вадим Викторович Гузиватый,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИНОЗ РАН.

e-mail: guzivaty@gmail.com

Михаил Арсеньевич Науменко,  
д.г.н., профессор, заведующий лабораторией  
гидрологии ИНОЗ РАН.

e-mail: naumenko@limno.org.ru

*Аннотация:* Сложность мониторинга положения малоразмерных объектов на дне заключается в значительной погрешности определения их местоположения, величина которой зачастую намного превышает размеры наблюдаемых объектов, что не позволяет достоверно идентифицировать и проследить динамику их перемещений. Данную проблему предлагается решать способом привязки однозначно опознаваемых на гидролокационном изображении объектов, относительно друг друга.

*Ключевые слова:* мониторинг, донный объект, гидролокатор бокового обзора, погрешность, гидролокационное изображение

При изучении рельефообразующих процессов в крупных озёрах мира, в том числе в Ладожском озере, существенное значение приобретают наблюдения за местоположением отдельных донных объектов. Смещения и деформации малоразмерных форм рельефа (небольших каменных скоплений, отдельных валунов и гряд) позволяют подробно охарактеризовать динамику процессов и оценить их степень интенсивности в зонах сейсмической активности, разломов и возможных оползневых движений. Такие наблюдения в принципе осуществимы при разработке соответствующей технологии выполнения гидролокационной съёмки и обработке полученной информации. Как отмечается в [1], «Морфометрическая «картина», которая может быть получена с помощью гидролокационного обследования дна, позволяет провести подробный анализ неоднородности геологического строения дна для определения характера тектонических движений и степени воздействия экзогенных рельефообразующих процессов».

Основная сложность мониторинга положения малоразмерных объектов на дне заключается в точности определения их местоположения, величина ошибки зачастую намного превышает размеры наблюдаемых объектов и тем самым не позволяет достоверно идентифицировать их.

Средняя квадратическая погрешность (скп) определения места донного объекта ( $\sigma_o$ ) при использовании гидролокатора бокового обзора (ГБО), допуская все погрешности в первом приближении независимыми, может быть рассчитана по формуле:

$$\sigma_o^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{ма}^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{ор}^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  - скп определения места плавсредства;

$\sigma_{ма}$  - скп определения места антенны ГБО;

$\sigma_u$  – скп измерения направления и расстояния до объекта;

$\sigma_{ор}$  – скп определения положения (ориентации) антенны ГБО в пространстве в момент излучения и приёма сигнала от объекта.

Рассматривая и анализируя эти погрешности можно сделать следующие допущения и предположения.

Погрешность определения места антенны ГБО, по-видимому, следует учитывать только в случае её буксировки за плавсредством. При установке антенны на борту (на опускаемой за борт штанге) данной погрешностью ввиду её малости можно пренебречь.

Погрешность измерения направления и расстояния до объекта ( $\sigma_u$ ), принимая направление излучения перпендикулярным направлению движению буксировки антенны ГБО может быть рассчитана по формуле [2]:

$$\sigma_u = \sqrt{\sin^2 \gamma \cdot \sigma_{D_0}^2 + (D_0 \cdot \cos \gamma)^2 \cdot \sigma_\gamma^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – среднее значение вертикального угла луча обнаружения объекта (см. рис.1);

$\sigma_{D_0}$ ,  $\sigma_\gamma$  – скп измерения расстояния до объекта и вертикального угла обнаружения (угла места);

$D_0$  – расстояние от антенны ГБО до объекта.

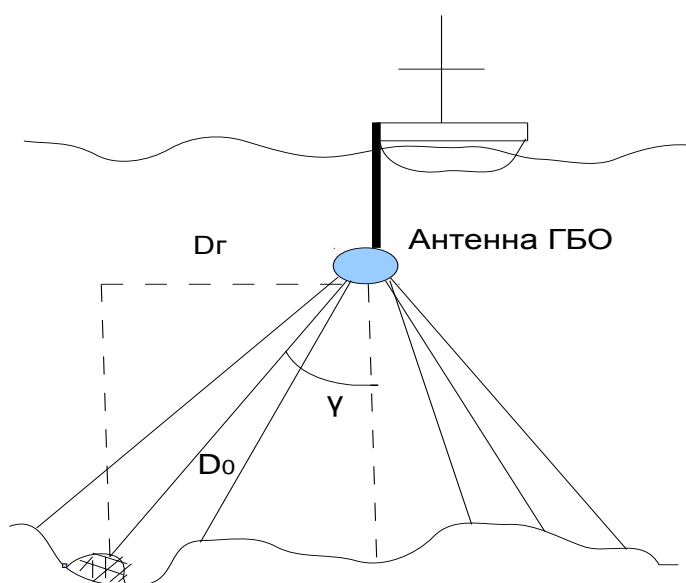


Рис.1. К определению погрешности измерения направления и расстояния до объекта.

Погрешность определения положения (ориентации) антенны ГБО в пространстве в момент излучения и приёма сигнала от объекта ( $\sigma_{ор}$ ), вследствие неточного учёта курса, крена и дифферента плавсредства, может вызвать существенную неопределённость в истинном местоположении объекта. Формула для расчёта этой погрешности будет [2]:

$$\sigma_{ор} = \sqrt{D_0^2 \frac{(\sigma_k^2 + \sigma_{кр}^2 + \sigma_d^2)}{(57,3)^2} + 3\sigma_{D_0}^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{кр}$ ,  $\sigma_d$  - погрешности определения курса, крена и дифферента антенны ГБО, соответственно.

В июле 2015 года были проведены гидролокационные съёмки в районе мористее юго-западного берега острова Валаам, между мысом Никоновским и островом Малым (рис. 2).



Рис.2. Район проведения работ. Треугольники обозначают местоположение фрагментов гидролокационного изображения.

Измерения проводились с использованием гидролокатора Lowrance Structure Scan (LSS-1) [1], антенна которого устанавливалась на штанге, прикреплённой к борту лодки. Курс, крен и дифферент лодки инструментально не измерялся и не учитывался. Съёмка выполнялась при отсутствии заметного волнения, т.е. при спокойном состоянии поверхности озера. Было выполнено несколько галсов вдоль берега, позволивших обнаружить отдельные камни, размером несколько метров (рис.3) и возможные подвижки каменных скоплений (рис.4). Эти объекты располагались на расстоянии 110-190 м от уреза воды в диапазоне глубин от 10 до 22 метров.

Трансформация и географическая привязка гидролокационного изображения производилась с использованием программы Sonar TRX фирмы Leraand Engineering Inc. (LEI) [3]. В качестве примера в докладе представлены фрагменты трансформированные изображения двух участков дна (рис. 3 и 4), которые будут использоваться для дальнейших рассуждений.

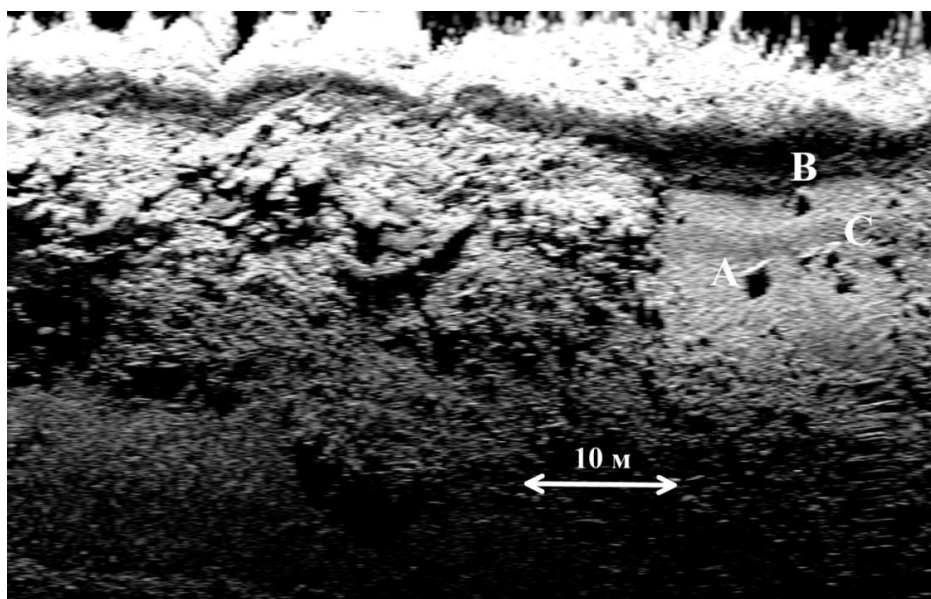


Рис. 3. Фрагмент гидролокационного изображения с опознаваемыми отдельными объектами.



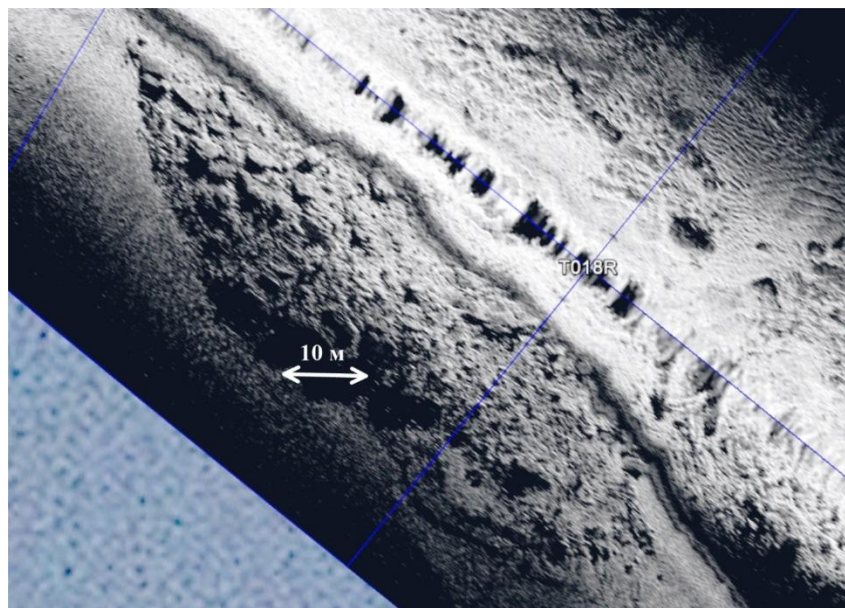


Рис.4. Фрагмент гидролокационного изображения осыпи камней.

При проведении работ местоположение лодки определялось по спутниковой навигационной системе (СНС) GPS, погрешность измерения координат с помощью которой в данном районе, в лучшем случае, составляет не менее 5-15м [4].

Оценим величины погрешностей определения местоположения объектов А и В.

Принимая для расчётов  $\sigma_c = 10$  м,  $D_0 = 100$  м,  $\gamma = 30^\circ$ ,  $\sigma_{D_0} = 1\%$  от  $D_0$ ,  $\sigma_\gamma = 1^\circ$ ,  $\sigma_k = \sigma_{кр} = \sigma_d = 3^\circ$ . получим неопределённость места донного объекта ( $\sigma_0$ ) равную **18,8 м**.

При такой неопределённости изменение местоположения даже хорошо определяемого на общем фоне дна объекта вряд ли будет отслеживаться достоверно.

Данная проблема может быть решена способом привязки отмеченных ГБО объектов относительно друг друга. Действительно, если удастся найти некие объекты на дне, хорошо и однозначно опознаваемые на гидролокационной картине дна, то они могут быть использованы как ориентиры, по которым возможно определение их смещения относительно друг друга. В этом случае исключается влияние погрешностей определения места плавсредства ( $\sigma_c$ ) и определения ориентации антенны ГБО в момент излучения и приёма сигнала от объекта ( $\sigma_{op}$ ). Более того, поскольку выбранные ориентиры облучаются практически в один и тот же момент времени, то вполне можно допустить, что в погрешность их взаимного расположения будут входить только погрешности измерения расстояния и направления между ними.

Для нашего примера неопределённость места каждого из них составит не более **1.6 м**. Реализация способа предполагает выбор характерных и хорошо опознаваемых на гидролокационном изображении отдельных объектов или группы их (гряды, оползня, осыпи и т.п.) в качестве ориентиров, которые затем можно будет использовать для оценки динамики изменения макрорельефа дна.

На рис. 3 можно выделить три достаточно хорошо опознаваемых объекта, которые могут быть использованы как ориентиры. Приняв, один из объектов, например, (А) за репер ( $X_{Ai} = 0$ ,  $Y_{Ai} = 0$ ), координаты двух других объектов ( $X_{Bi}$ ,  $Y_{Bi}$  и  $X_{Ci}$ ,  $Y_{Ci}$ ) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X_{Bi} &= D_{Bi} \sin\beta_i & Y_{Bi} &= D_{Bi} \cos\beta_i; \\ X_{Ci} &= D_{Ci} \sin\gamma_i & Y_{Ci} &= D_{Ci} \cos\gamma_i; \end{aligned} \quad (5)$$

Направления от репера А на объекты В и С будут  $\beta_1$  и  $\gamma_1$  (рис.5).

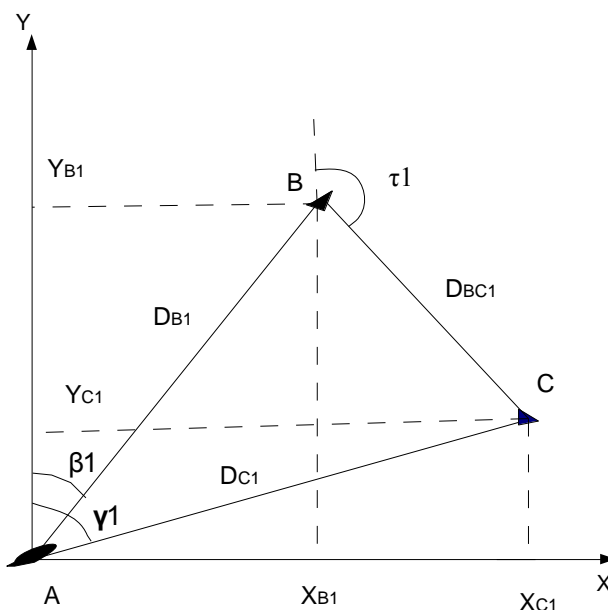


Рис.5. Схема принятой для ориентиров системы координат.

Принимая скп измерения расстояния и направления на гидролокационном изображении равными 0,5 мм в масштабе изображения (для выбранного фрагмента  $M= 1:300$ ) и  $0,5^\circ$  соответственно, получим скп определения мест ориентиров В и С относительно принятого репера А (расстояние  $AB = 6,18$  м,  $AC= 6,24$  м) 0,16 м.

При такой величине погрешности, если имеет место какая-либо заметная динамика смещений, то она несомненно проявится и может быть количественно учтена. Изменение геометрии взаимного расположения объектов-ориентиров позволит не только подтвердить факт их подвижки, но и получить дополнительные данные о направлении смещений.

При наличии в обследуемом районе заметных протяжённых объектов, например, как на рис. 4 осыпи камней, целесообразно использовать их наряду с характерно выраженными точечными объектами. Изменение границ протяжённых объектов и их ориентации в пространстве позволит получить дополнительные данные о смещении грунта. Кроме того, протяжённые объекты также дают возможность оценить и степень накопления материалов, за период наблюдений. Действительно, анализируя изменения очертаний и площадь отмеченного объекта, можно получить информацию о динамике и направлении его смещения, и размерах за некоторый промежуток времени (рис.6).

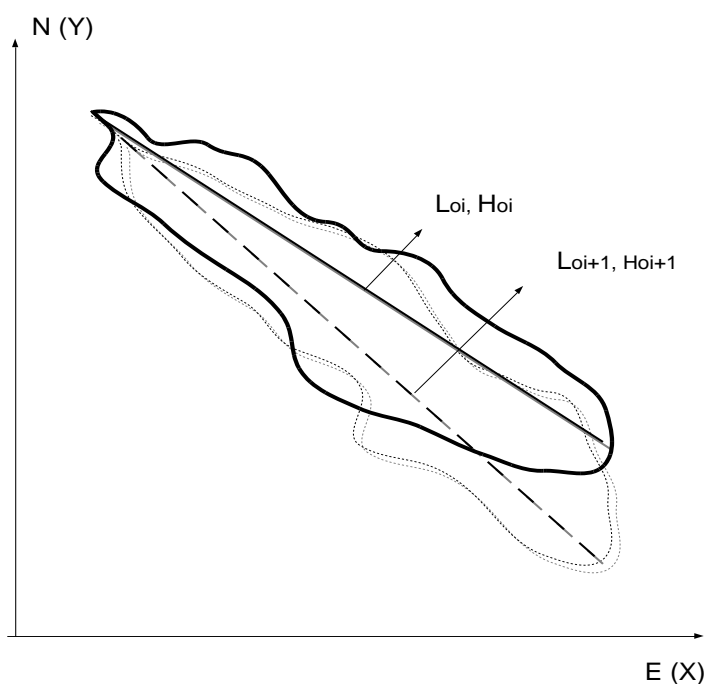


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая расчёт смещения протяжённого объекта за период  $i+1$ .

Приведение площади протяжённых объектов к какой-либо уровенной (горизонтальной) поверхности, по-видимому, не имеет особого смысла, поскольку можно предположить, что общий наклон дна за короткие сроки наблюдений и на ограниченном участке будет изменяться незначительно.

Для получения достоверных результатов тенденций смещений объектов, грунта и их динамики необходимо проводить периодические наблюдения за определённым числом групп (не менее 7-9) объектов-ориентиров и протяжённых объектов, выступающих в качестве тест-объектов, равномерно расположенных по исследуемой зоне.

Смещение и деформация малоразмерных форм рельефа (небольших каменных скоплений, отдельных валунов и гряд) позволяют охарактеризовать динамику процессов и оценить их степень интенсивности в зонах сейсмической активности, разломов и оползневых движений.

На основе предлагаемых теоретических подходов по материалам периодической детальной гидролокационной съёмки предполагается разработка технологии проведения мониторинга величин и направлений смещений донных объектов и грунта. В качестве экспериментального района планируется район у юго-западного берега острова Валаам, между мысом Никоновским и островом Малым.

#### Литература:

1. Нестеров Н. А., Науменко М. А., Гузиватый В. В., Каретников С. Г. Гидролокационное обследование при геоморфологических исследованиях // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета, №39, 2015. С.17-24.
2. Практическое кораблевождение / Под редакцией Михайловского А. П. ГУНиО МО СССР. Адм. №9035.1, 1988 г. 896 с.
3. <http://www.sonartrx.com>
4. Нестеров Н. А. Методы определения координат с использованием глобальной позиционной системы при проведении гидрографических работ. Записки по гидрографии, № 272. 2008.



## HYDROLOCATION MONITORING OF SEABED FEATURES

Nikolai Arcadieievich Nesterov,  
D.Sc, professor, head of the Laboratory of Geography and Environmental Sciences,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
e-mail: NNesterovmail@yandex.ru

Vadim Victorovich Guzivaty,  
PD, senior researcher of the Hydrology Laboratory  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
e-mail: [guzivaty@gmail.com](mailto:guzivaty@gmail.com)

Mikhail Arsenievich Naumenko,  
D.Sc, professor, head of the Hydrology Laboratory,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
e-mail: [naumenko@limno.org.ru](mailto:naumenko@limno.org.ru)

*Abstract:* The main difficulty of monitoring small-size objects at the bottom is in accurately determining their location, the error magnitude is often far greater than the sizes of observed objects and thereby not reliably identify and trace the dynamics of their relocation. This problem is proposed to solve the method of binding the objects uniquely identifiable on the sonar picture, relative to each other.

*Keywords:* side scan sonar, error, sonar image

## РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД ВЕСЕННЕЙ ПОДЛЕДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Николай Иннокентьевич Пальшин,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
e-mail: [npalshin@mail.ru](mailto:npalshin@mail.ru)  
Роман Эдуардович Здоровеннов,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Андрей Васильевич Митрохов,  
главный гидролог ИВПС КарНЦ РАН  
Галина Эдуардовна Здоровеннова,  
к.г.н., и.о. заведующего лабораторией ИВПС КарНЦ РАН  
Татьяна Владимировна Ефремова,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН  
Галина Геннадиевна Гавриленко,  
аспирант, младший научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН  
Сергей Юрьевич Волков,  
аспирант, и.о. младшего научного сотрудника  
ИВПС КарНЦ РАН  
Сергей Рэмович Богданов,  
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН  
Аркадий Юрьевич Тержевик,  
к.т.н., ведущий научный сотрудник  
ИВПС КарНЦ РАН

*Аннотация:* Приводятся результаты анализа данных потоков солнечной радиации на поверхности снежно-ледового покрова и в водной толще Петрозаводской губы Онежского озера в период весенней подледной конвекции. Показана суточная и синоптическая изменчивость потоков радиации, оценен коэффициент ее ослабления в толще воды.

*Ключевые слова:* солнечная радиация, период ледостава, коэффициент ослабления, альbedo, Онежское озеро

На водоемах умеренной зоны зимой при большой толщине снежного покрова поток солнечной радиации, проникающей в водную толщу, пренебрежимо мал [5]. Весной солнечная радиация становится основным источником энергии в озерах. По мере таяния, одновременно с уменьшением толщин снега и льда происходят изменения их плотности, текстуры и структуры. Это приводит к значительной изменчивости их оптических свойств во времени и пространстве и требует накопления большого количества разнообразных натуральных данных для параметризации радиационных процессов в толще снежно-ледяного покрова.

Исследование радиационного режима Петрозаводской губы Онежского озера проводилось в марте 2015 г. в рамках международного междисциплинарного проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений», поддержанного фондом ЭЛЕМО (Швейцария) [1]. В марте 2015 г. в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера была размещена радиационная станция (рис. 1). Измерение потоков падающей и отраженной солнечной радиации на поверхности снежно-ледового покрова проводилось с использованием пиранометров «Star-shaped pyranometer» немецкой фирмы «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme». Пиранометры были укреплены на специальной конструкции, на высоте около одного метра над поверхностью льда. Поток

солнечной радиации на нижней границе льда измерялся с помощью универсального пиранометра М80-м, произведенного в России. Подледный пиранометр был закреплен на обладающей положительной плавучестью платформе и помещен на расстояние около 1.5 м от лунки непосредственно под нижнюю границу льда.

Для измерения потока фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР, длины волн 400-700 нм) в водной толще озера использовались ФАР-датчики производства фирмы «Alec Electronics», Япония. Верхний датчик располагался непосредственно подо льдом, остальные через один метр до глубины 8 м. Датчики были прикреплены к заякоренному тросу.

Рядом с радиационной станцией со льда была установлена термокоса.

Дискретность измерений радиации пиранометрами и ФАР-датчиками, как и температуры воды, составляла одну минуту. В период измерений на станции ежедневно осуществлялось измерение толщины снежно-ледового покрова и описание состояния его поверхности.

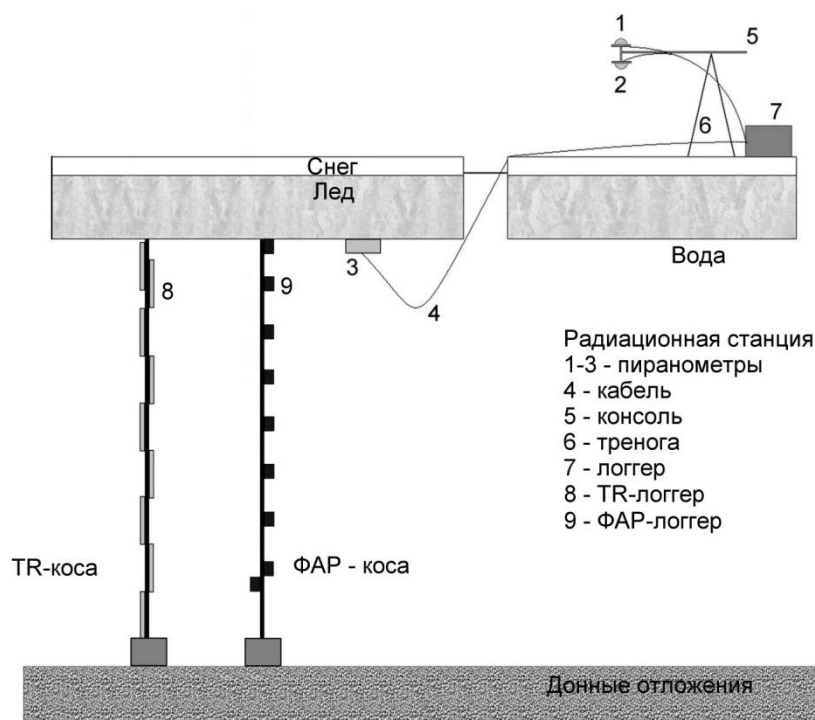


Рис. 1. Станция радиационных измерений.

Значение альбедо поверхности вычислялось как отношение потока отраженной солнечной радиации ( $E_u$ ) к падающей ( $E_d$ ) на поверхности льда:

$$\alpha = \frac{E_u(0)}{E_d(0)} \quad (1)$$

Прозрачность льда определялась как отношение потока на нижней границе льда к потоку, прошедшему через его поверхность:

$$\tau = \frac{E_d(z)}{(1-\alpha)E_d(0)} \quad (2)$$

где  $E_d(z)$  падающая радиация на нижней границе льда.

Коэффициент ослабления солнечной радиации в толще воды рассчитывался по формуле:

$$K_w(z, z_1) = -\frac{1}{z_1 - z} \ln \left( \frac{E_d(z_1)}{E_d(z)} \right) \quad (3)$$

где  $z$  и  $z_1$  – нижняя поверхность льда и глубина, м

Потоки падающей и отраженной солнечной радиации на верхней границе снежно-ледового покрова изменялись в широких пределах в зависимости от погодных условий, в первую очередь, облачности и осадков (рис. 2, а). В период 15-22 марта дневные максимумы падающей радиации изменялись от 400 до 500 Вт/м<sup>2</sup>, отраженной – от 70 до 120 Вт/м<sup>2</sup>, подледной – от 70 до 140 Вт/м<sup>2</sup>. После выпадения свежего снега 23 и 24 марта резко уменьшился поток подледной радиации – до 16 Вт/м<sup>2</sup>.

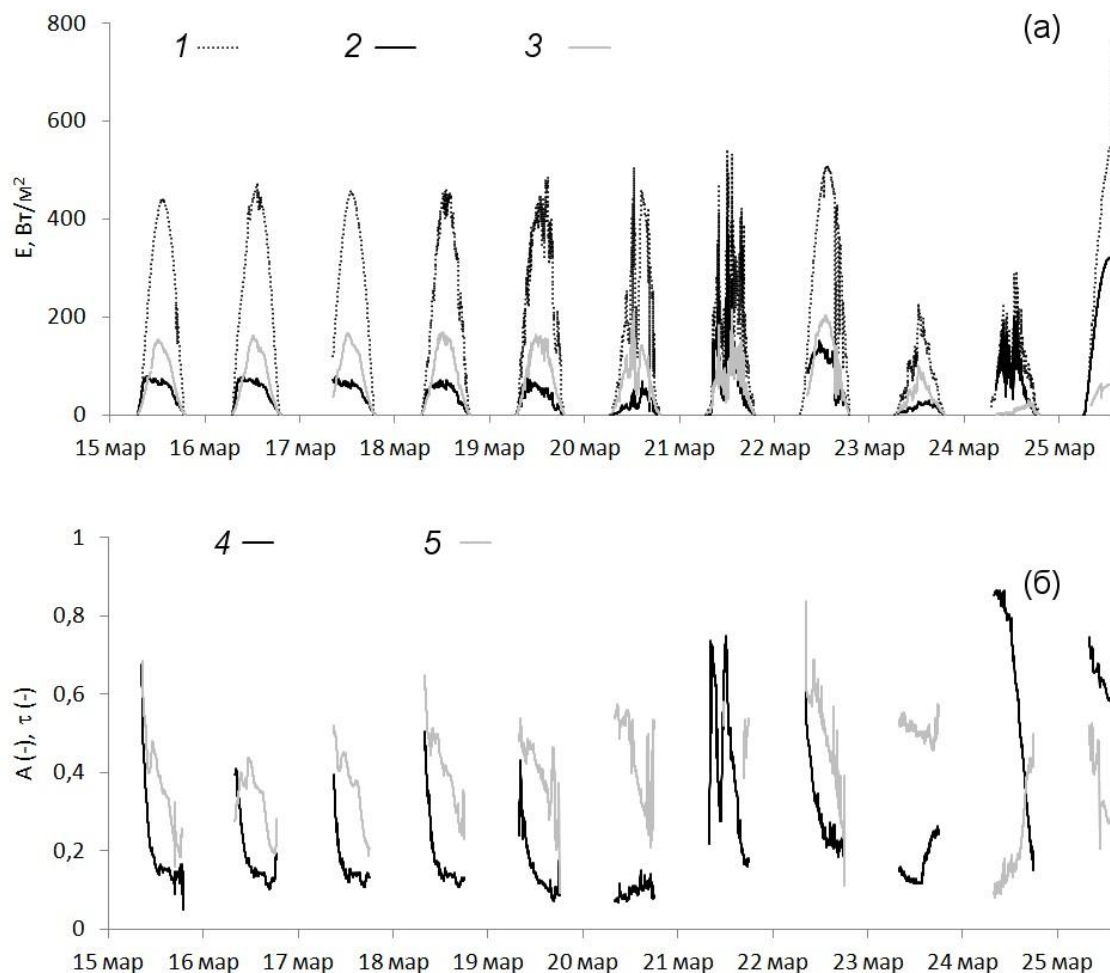


Рис. 2. (а) Потоки падающей (1), отраженной (2) и подледной (3) солнечной радиации в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера 15-25 марта 2015 г. (б) Альbedo поверхности снежно-ледяного покрова (4) и прозрачность льда (5).

Альbedo поверхности озера в начале измерений, пока поверхность льда была свободна от снега, составляло 0.4 в утренние часы, затем в течение дня по мере таяния снижалось до 0.2 (рис. 2, б). После выпадения свежего снега альbedo резко увеличилось до 0.7-0.8, однако, в связи с тем, что снег достаточно быстро таял, пропитывался водой, альbedo быстро уменьшалось. Прозрачность снежно-ледяного покрова можно охарактеризовать с помощью коэффициента ослабления солнечной радиации  $\tau$ , который можно определить как отношение радиации, дошедшей до нижней границы льда к радиации, прошедшей через верхнюю границу снега (падающая минус отраженная), формула 2. Этот коэффициент зависит от толщины и структуры снежно-ледяного покрова. В период измерений толщина льда изменилась незначительно, около 41 см в начале измерений, около 39 см в конце. Снег появился на льду лишь после 23 марта. В период измерений коэффициент  $\tau$  изменялся в широких пределах – от 0.2 до 0.6, при выпадении снега – резко снижался, при таянии – повышался.

Поток фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), проникающий в водную толщу озера, в период измерений изменялся в пределах 500-1500  $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Заметное снижение потока ФАР в подледном слое наблюдалось после выпадения снега 23-24 марта (рис. 3, а). С увеличением глубины поток ФАР быстро уменьшался и глубже 3-4 м был практически равен нулю.

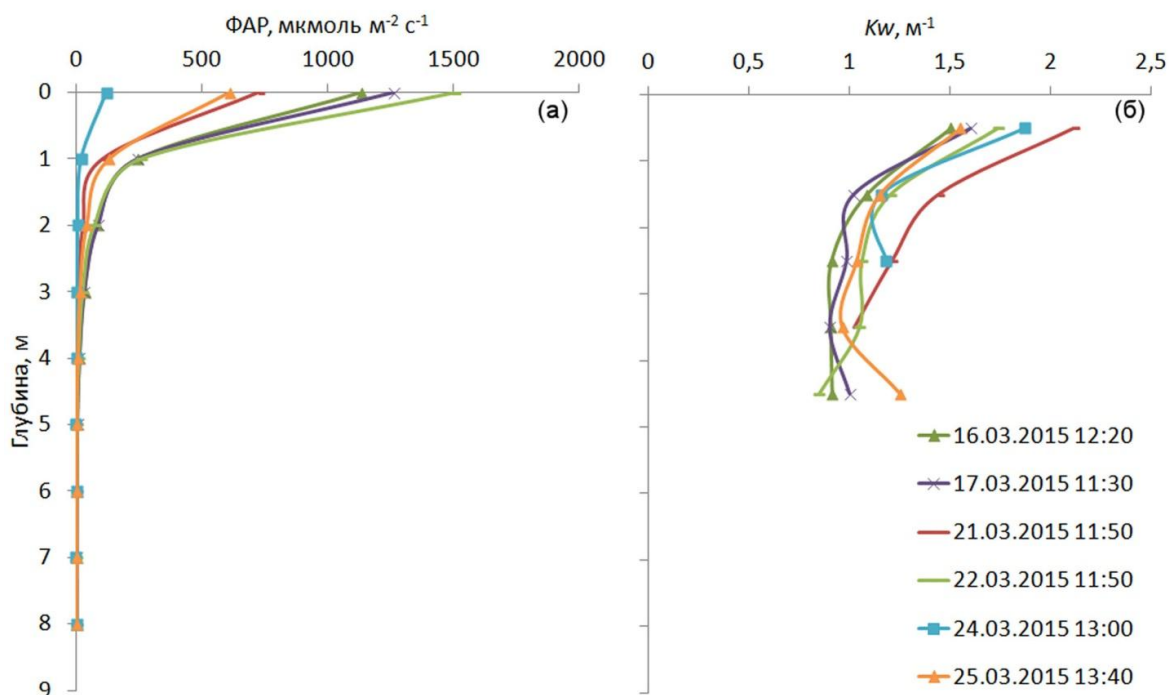


Рис. 3. Вертикальные профили ФАР (а) и коэффициента ослабления солнечной радиации в толще воды (б) в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в марте 2015 г.

Значения коэффициента ослабления ФАР в толще воды  $K_w$  изменялись в пределах от 0.8 до 2.2  $\text{м}^{-1}$  при среднем значении около 1  $\text{м}^{-1}$  в течение периода измерений (рис. 3, б). При этом максимальные значения  $K_w$  были приурочены к подледному метровому слою.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Feel Foundation, “Fondation pour l’étude des eaux du Léman” (Швейцария).

#### Литература:

1. Филатов Н. Н. Совместный российско-швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер / Н. Н.Филатов, А. Ю. Тержевик // Труды КарНЦ РАН. – 2015. – №5. – С. 86-88.
2. Чехин Л. П. Световой режим водоемов / Л.П. Чехин. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. – 1987. – 130 с.

## RADIATION REGIME OF PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO DURING SPRING UNDER-ICE CONVECTION

Nikolay Innokentievich Palshin,  
Ph. D., Senior Researcher  
Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS (NWPI)  
e-mail: [npalshin@mail.ru](mailto:npalshin@mail.ru)  
Roman Eduardovich Zdorovenov,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Andrey Vasilievich Mitrokhov,  
Senior Hydrologist NWPI  
Galina Eduardovna Zdorovenova,  
Ph. D., acting as Head of Laboratory NWPI  
Tatiana Vladimirovna Efremova,  
Ph. D., Senior Researcher NWPI  
Galina Gennadievna Gavrilenko,  
Graduate Student, Junior Researcher NWPI  
Sergey Yurievich Volkov,  
Graduate Student, acting as Junior Researcher NWPI  
Sergey Removich Bogdanov,  
Doctor of Science, Leading Researcher NWPI  
Arkady Yurievich Terzhevnik,  
Ph. D., Leading Researcher NWPI

*Abstract:* The results of the analysis of solar radiation fluxes on the surface of snow and ice and into a water column of the Petrozavodsk bay of Lake Onego during the spring ice convection are given in the article. Daily and synoptic variability of radiation fluxes is shown. The coefficient of radiation attenuation in a water column is estimated.

*Keywords:* solar radiation, ice-period, attenuation coefficient, albedo, Onego Lake

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ПРИТОКОВ

Татьяна Николаевна Петрова,  
научный сотрудник ИНОЗ РАН,

E-mail: [tatianik@mail.ru](mailto:tatianik@mail.ru)

Мария Андреевна Гусева,  
младший научный сотрудник ИНОЗ РАН,

E-mail: [velependere@gmail.com](mailto:velependere@gmail.com)

*Аннотация:* В работе рассматривается изменение концентраций таких металлов как железо, алюминий, марганец, медь и свинец в воде Ладожского озера и его притоков за многолетний период наблюдений. Показаны характерные различия в их содержании в воде рек, принадлежащих разным частям водосбора, а также временная и пространственная неоднородность их распределения в озере.

*Ключевые слова:* металлы, Ладожское озеро, притоки Ладожского озера, железо, алюминий, марганец, медь, свинец

Металлы - один из наиболее активных компонентов природных вод. Находясь в водной среде, они перераспределяются между абиотическими и биотическими компонентами и взаимодействуют с ними. Химическая и биологическая активность металлов определяется не только валовыми концентрациями, но и их физико-химическим состоянием в воде, которое обусловлено физико-химическими, биологическими и гидродинамическими параметрами водной среды. В связи с этим, большое значение приобретают сведения о поступлении и перераспределении их в таком крупном озере как Ладожское, водные ресурсы которого являются источником питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга и играют важнейшую роль в обеспечении жизнедеятельности всего Северо-Западного региона.

Систематические наблюдения за содержанием и распределением некоторых металлов в воде притоков Ладожского озера, р. Невы и в самом озере проводятся в Институте озероведения РАН начиная с 1982 года. В разные годы определялось содержание таких элементов как железо, алюминий, марганец, медь, кобальт, свинец, цинк, кадмий, хром. В последние годы (после 2000 г.) в основном определялось содержание железа, алюминия, марганца, меди и свинца, иногда к ним добавлялся цинк. В работу вошли собственные и литературные [1-7] данные о содержании металлов в воде Ладожского озера и его притоков. Используемые в данной работе данные получены в пробах воды, которые отбирались в основных и некоторых малых притоках Ладожского озера, а также по стандартной сетке станций на всей акватории озера (Рисунок 1) в весенний, летний и осенний периоды. В нефитрированных пробах воды, предварительно зафиксированных концентрированной азотной кислотой, определялось общее содержание металлов методом атомной абсорбции на анализаторе Квант-З.ЭТА. Химический состав воды озера, в том числе и содержание металлов, определяются поступлением веществ с водосбора, а также происходящими в озере гидрологическими и биологическими процессами. Одним из основных факторов, определяющих неоднородность лимнических процессов, является морфометрия озерной котловины. В связи с этим пространственное распределение металлов в озере рассматривается на основе морфометрического районирования по лимническим зонам [8], имеющим характерные особенности по целому комплексу озерных характеристик (Рис.1). Каждая из этих зон играет особую роль в функционировании экосистемы в целом. Средние для озера концентрации металлов рассчитаны как средневзвешенные с учетом объемов лимнических зон.



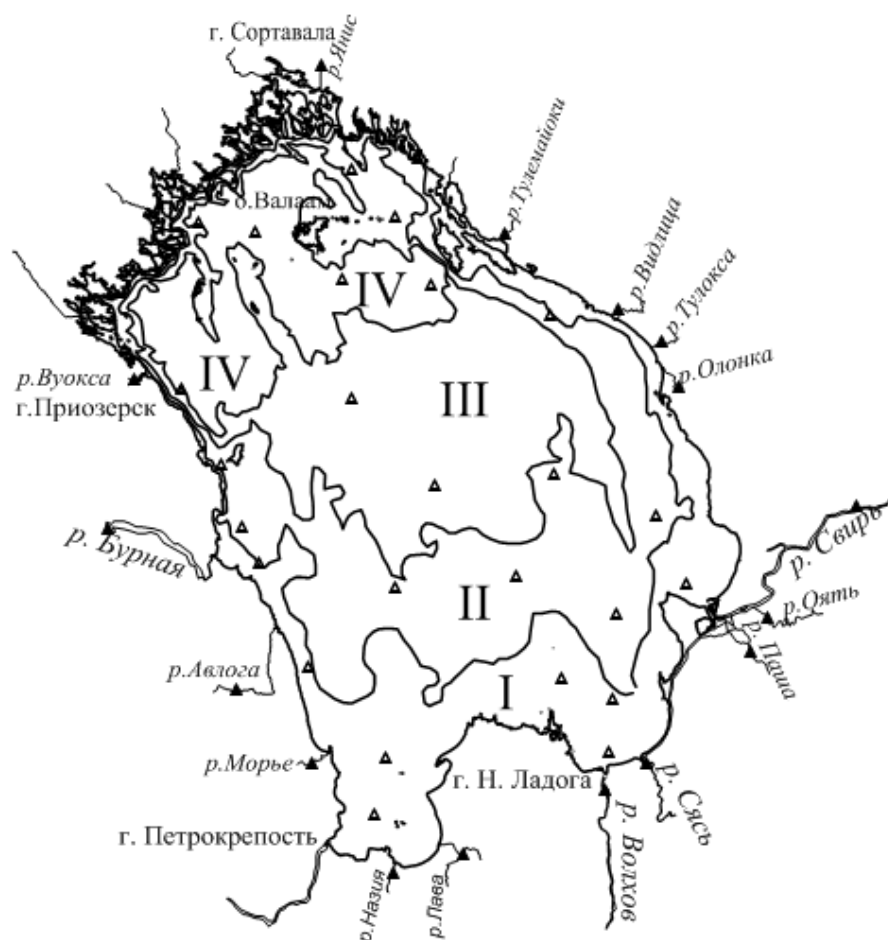


Рис. 1. Расположение точек отбора проб на притоках и акватории Ладожского озера и лимнические зоны озера (I – Прибрежная, II – Деклинальная, III – Профундальная, IV – Ультрапрофундальная).

Реки являются основным поставщиком металлов в Ладожское озеро. Наибольшую роль играют главные притоки, Волхов, Свирь и Вуокса, которые приносят 75 % железа, 86 % алюминия, 83 % марганца, 82 % меди и 86 % свинца от общего речного поступления каждого из металлов [4]. Наиболее низкие концентрации металлов из трех главных притоков присущи рекам Бурная, ее южному рукаву р. Вуоксе и Свири, сток которых сильно зарегулирован, а водосборы расположены в зоне распространения кристаллических пород. По содержанию металлов к ним примыкает северный приток - р. Янис. Более высокие концентрации в третьем главном притоке - р. Волхов и в реках северо-восточного (рр. Тулема, Видлица и Тулокса), восточного и юго-восточного побережий (рр. Олонка, Оять, Паша, Сясь). Водосборы этих рек сложены осадочными породами, которые перекрыты толщей четвертичных отложений, также здесь велики площади заболоченных территорий. Водосборы Волхова и Сяси подвержены значительному хозяйственному воздействию. В воде этих двух рек обычно очень высокие среднегодовые концентрации металлов. Иногда значительные концентрации отмечаются и в воде р. Олонки. Наиболее высоким содержанием металлов обычно характеризуются малые реки южного побережья озера – Назия, Лава, Морье и Авлога, но вследствие небольшой водности их влияние на озеро очень незначительно.



Таблица 1

Диапазоны концентрации **железа и алюминия** ( $\text{мкг л}^{-1}$ ) в воде основных притоков Ладожского озера в разные годы

Притоки		Годы					
		2006-2008	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Fe</b>							
Свирь		739-1160	636-1235	416-1123	274-310	92-672	176-1050
Бурная		110-617	431-1655	253-786	187-362	129-373	210-1137
Вуокса		228-945	668-1184	320-524	207-492	197-329	334-684
Волхов		405-2890	1225-1781	698-1037	389-988	363-983	345-3860
Побережье	Северное	242-1360	1018-2190	470-1381	429-628	292-733	517-1140
	Сев.-восточное, восточное	-	932-2613	697-1806	444-1618	321-1417	474-2562
	Юго-восточное	248-4170	1734-3420	1174-2360	767-2430	857-1776	1000-5420
	Южное	-	1486-5560	1200-4656	835-6460	591-2776	350-4520
<b>Al</b>							
Свирь		30-400	26-31	198-318	80-191	80-696	37-234
Бурная		58-171	16-27	316-590	105-196	136-613	65-301
Вуокса		38-90	14	67-153	52-400	189-253	60-484
Волхов		44-463	342-802	255-320	102-335	194-658	160-600
Побережье	Северное	70-736	34-517	415-652	126-420	215-419	133-293
	Сев.-восточное, восточное	-	40-592	107-1080	166-372	179-821	130-575
	Юго-восточное	28-1420	100-1975	183-709	71-430	254-665	130-904
	Южное	-	120-846	301-1020	145-896	134-898	103-778

В химическом составе речных вод преобладающим среди металлов является железо, диапазон его концентрации наиболее широк. На втором месте содержание алюминия и марганца, что определяется геохимическими условиями региона, намного более низким является содержание меди.

Содержание свинца в воде притоков очень невелико и в 2011-2015 гг. в основном было ниже предела обнаружения или не превышало  $0.5 \text{ мкг л}^{-1}$ . Только в отдельных случаях в воде рр. Волхов, Тулокса, Паша и Олонка оно повышалось до  $1.0 - 1.5 \text{ мкг л}^{-1}$ , а в малых реках Назия, Морье и Авлога - до  $2.7 - 5.5 \text{ мкг л}^{-1}$ .

Для концентраций железа и марганца характерно значительное увеличение содержания от северных притоков к восточным и южным, в распределении алюминия и меди такого не наблюдается.

Сезонная динамика содержания металлов выражена не четко и часто зависит от погодных условий в момент отбора проб. Диапазоны концентраций железа, алюминия, марганца и меди в воде притоков Ладожского озера за последние годы представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 2

Диапазоны концентрации **марганца** и **меди** ( $\text{мкг л}^{-1}$ ) в воде основных притоков Ладожского озера в разные годы

Притоки		Годы					
		2006-2008	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Mn</b>							
Свирь		19-52	12-40	14-61	18-31	17-51	16-42
Бурная		4-23	14-56	35-56	11-35	18-28	15-20
Вуокса		70-110	11-56	56-151	10-155	51-69	9-84
Волхов		22-166	16-113	81-108	86-111	132-257	91-238
Побережье	Северное	9-22	9-14	18-48	8-26	13-31	11-14
	Сев.-восточное, восточное	-	16-74	27-100	23-128	20-223	15-144
	Юго-восточное	46-178	13-136	59-184	19-162	54-176	45-207
	Южное	-	13-303	124-431	38-603	55-556	62-640
<b>Cu</b>							
Свирь		0.9-1.0	4.4-21	1.0-1.3	0.8-1.4	-	-
Бурная		0.9-1.0	4.6-5.4	1.5-4.2	1.3-2.2	-	-
Вуокса		1.1-1.2	2.5-7.0	1.8-2.6	1.5-1.8	-	-
Волхов		1.4-1.8	2.4-7.8	2.3-3.7	1.4-2.4	-	-
Побережье	Северное	0.9-1.4	3.6-6.2	1.8-2.5	1.0-1.9	-	-
	Сев.-восточное, восточное	-	2.2-8.8	0.7-2.0	0.7-2.7	-	-
	Юго-восточное	0.7-3.1	1.5-6.3	1.0-2.3	0.6-2.1	-	-
	Южное	-	2.1-10.2	1.1-18.4	0.6-5.3	-	-

Полученные данные показали, что по сравнению с 2006-2008 гг., в 2011-2015 гг. в ряде случаев содержание некоторых металлов в воде рек увеличилось. Так в Волхове, Янисе и в реках юго-восточного побережья значительно поднялась нижняя граница диапазона концентрации железа. Максимальные величины не претерпели столь больших изменений. Повышенные концентрации алюминия в 2011 году были характерны для рр. Сясь и Волхов. С 2012 г. нижняя граница диапазона алюминия также значительно выросла во всех реках. Высокими концентрациями меди во всех реках отличался 2011 год. В содержании марганца заметных межгодовых различий не наблюдалось.

Содержание и распределение металлов индивидуально для каждого водоема и зависит от его морфологии, гидрологического и гидрохимического режимов, степени трофности, характера водосбора. Результаты многолетних наблюдений за содержанием металлов в воде Ладожского озера показывают, что, как и в воде притоков, в химическом составе воды озера преобладающими в количественном отношении являются железо и алюминий, что определяется геохимическими условиями региона. Содержание марганца и меди в несколько раз ниже. Концентрации железа, алюминия и марганца колеблются в значительных пределах. Так за период 2009-2012 гг. содержание железа изменялось от 32 до 823  $\text{мкг л}^{-1}$ , алюминия от 3 до 150  $\text{мкг л}^{-1}$ , марганца от 0.8 до 47.6  $\text{мкг л}^{-1}$ . Более узок, по сравнению с этими металлами диапазон концентраций меди (1.0 – 19.2  $\text{мкг л}^{-1}$ ) и свинца (< 0.5 – 2.1  $\text{мкг л}^{-1}$ ). В качестве примера в таблице 3 приведены диапазоны концентраций металлов в воде озера полученные в 2010 г., когда наблюдениями был охвачен весь период открытой воды. В таблице не представлены концентрации свинца, т.к. в основном они меньше или равны 0.5  $\text{мкг л}^{-1}$ .

Таблица 3

Пределы концентраций металлов (мкг л<sup>-1</sup>) в воде Ладожского озера в 2010 г.

Сезон	Зона озера	Fe	Al	Mn	Cu
Весна	Прибрежная	74-787 (823)	30-150 (139)	1.3-37 (47.6)	4.1-9.2 (19.2)
	Деклиналильная	56-623	26-127	1.4-37	2.0-9.3
	Профундальная	51-81	25-34	1.2-3.4	1.8-2.1
	Ультрапрофундальная	40-56	26-35	0.8-1.2	2.4-3.2
	Все озеро	40-787	25-127	0.8-37	1.8-9.3
Лето	Прибрежная	52-270 (331)	31-56	2.7-13.7	2.3-9.5
	Деклиналильная	125-252	18-58	2.1-7.4	2.4-8.8
	Профундальная	32-129	18-34	1.2-4.9	2.3-8.2
	Ультрапрофундальная	55-116	28-34	1.3-2.4	1.7-3.6
	Все озеро	32-270	18-58	1.2-11.1	1.7-9.5
Осень	Прибрежная	51-246 (351)	8-30	2.7-7.8 (14.0)	6.0-17.9
	Деклиналильная	60-115	10-22	2.0-5.4	3.0-9.6
	Профундальная	43-71	12-25	1.2-2.2	6.3-12.8
	Ультрапрофундальная	47-62	12-17	0.9-1.9	3.1-12.2
	Все озеро	43-246	8-30	0.9-7.8	3.0-17.9

Примечание: в скобках указаны значения для Волховской губы.

Неравномерность распределения металлов в водной массе озера обусловлена, главным образом, местонахождением источников их поступления и гидродинамическим режимом водоема. Повышенные концентрации металлов приурочены в основном к районам впадения вод крупных притоков, а также промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, поэтому типичным является увеличение их концентраций и наибольшая изменчивость в прибрежной зоне.

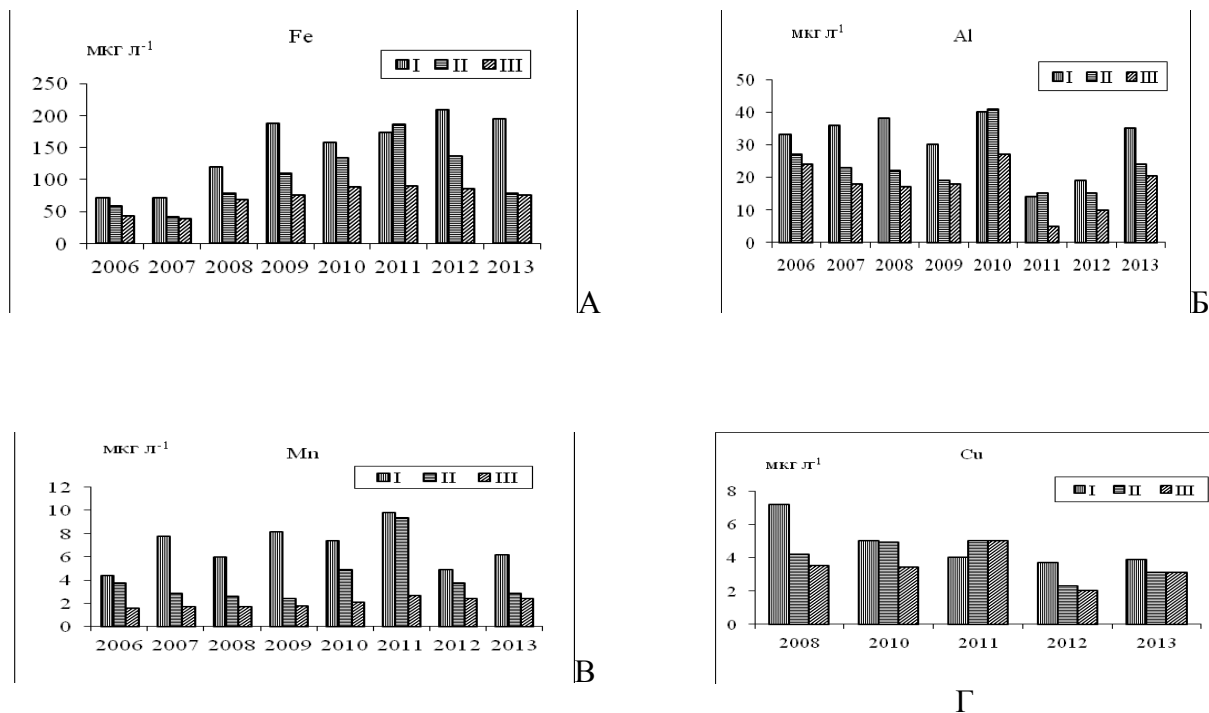
Таблица 4

Средние концентрации металлов (мкг л<sup>-1</sup>) в водах прибрежной зоны озера в 2010 г.

Район прибрежной зоны озера	Металлы	Май	Август	Октябрь
Волховская и Свирская губы	<b>Fe</b>	561	230	591
	<b>Al</b>	115	47	53
	<b>Mn</b>	27,5	10,4	9,0
	<b>Cu</b>	9.2	6.1	-
	<b>Pb</b>	0.5	1.1	1.1
Западное побережье	<b>Fe</b>	110	62	80
	<b>Al</b>	49	32	32
	<b>Mn</b>	4,1	3,3	3,8
	<b>Cu</b>	4.5	3.6	-
	<b>Pb</b>	0.5	1.0	1.0

Реки Волхов и Сясь оказывают наибольшее влияние на увеличение концентрации металлов в прибрежной зоне, поэтому в Волховской и Свирской губах особенно часто прослеживаются максимальные концентрации металлов. Иногда влияние волховских вод ощущается и в юго-восточной части деклиналильной зоны. Вдоль открытого западного побережья, где поступление металлов с водами притоков менее значительное и существует хороший водообмен с основной водной массой, концентрации металлов близки к средним для озера (Таблица 4). Воды

профундальной и ультрапрофундальной зон характеризуются более низкими концентрациями железа, алюминия, марганца, меди и свинца и содержание этих металлов здесь отличается меньшей изменчивостью. В связи с тем, что на долю глубоководных профундальной и ультрапрофундальной зон приходится почти 80 % объёма озера, можно считать наблюдаемые в этих зонах концентрации металлов средними для водоема. Рисунок 2 (А-Г) иллюстрирует различие в содержании металлов (средневзвешенные концентрации) в летний период в разных зонах Ладожского озера и изменения их концентраций за последние годы.



I – Прибрежная зона, II – деklinальная зона,  
 III – Профундальная + Ультрапрофундальные зоны

Рис. 2 (А-Г) - Изменение средних концентраций металлов в воде разных зон озера в летний период.

Прослеживается отчетливая межгодовая изменчивость в содержании металлов в воде озера. Средневзвешенные концентрации железа, алюминия, марганца и меди в летний период 2006 – 2013 гг. представлены на рисунках 3 и 4. Видно, что по сравнению с 2006-2007 гг. начиная с 2008 г. возросло содержание железа, с 2009 г. – марганца. Средневзвешенные концентрации алюминия по сравнению с 2006-2008 гг. немного увеличились летом 2010 г., однако в дальнейшем, в 2011-2012 гг., сильно понизились во всех зонах озера. Средние концентрации меди во всех зонах озера, кроме прибрежной, в 2012 г были в 2 раза ниже, чем в 2011 г.

Возможно, повышение концентраций металлов в воде Ладожского озера связано с нарушением продукционно-деструкционных процессов, изменениями кислородного режима, которые отмечаются в последние годы. Также могло сказаться увеличение содержания металлов, особенно железа, в воде притоков озера.

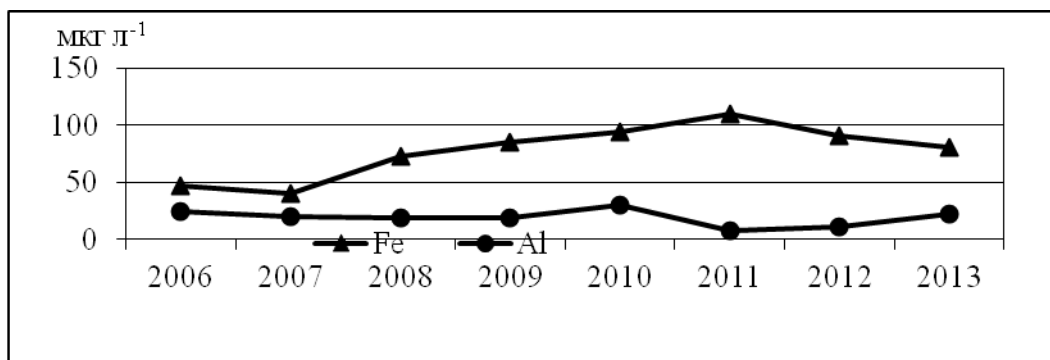


Рис. 3. Межгодовое изменение средневзвешенных концентраций железа и алюминия в воде Ладолжского озера в летний период.

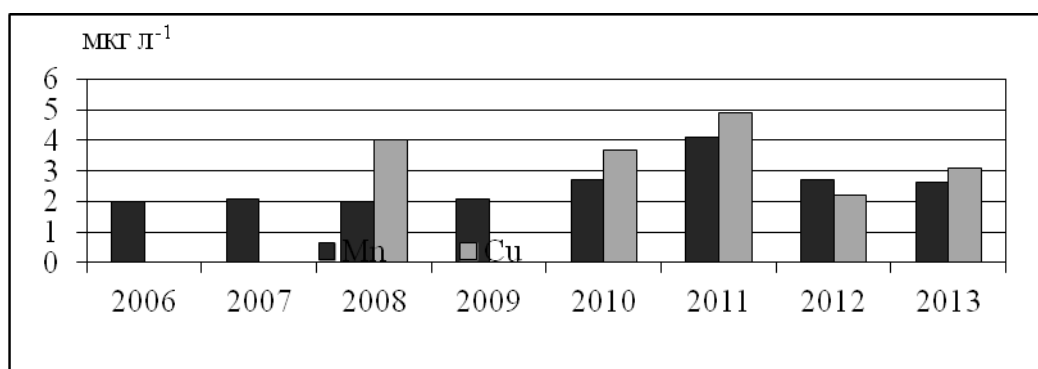


Рис.4. Межгодовое изменение средневзвешенных концентраций марганца и меди в воде Ладолжского озера в летний период.

#### Литература:

1. Черных О. А. Распределение микроэлементов по акватории озера // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Петровой Н. А., Расплетинной Г. Ф. Л.: Наука, 1987, С.80-83.
2. Расплетина Г. Ф., Мурашева Е. Б., Трегубова Т. М., Кулиш Т. П., Черных О. А. Гидрохимическая характеристика притоков // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Петровой Н.А., Расплетинной Г.Ф. Л.: Наука, 1987, С. 27-41.
3. Гусаков Б. Л., Петрова Н. А., Курашов Е. А., Слепухина Т. Д., Зайцева И. И., Петрова Т. Н., Черных О. А. Критерии состояния экосистемы Ладожского озера // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Петровой Н.А., Тержевика А.Ю. СПб.: Наука, 1992. С. 280-295.
4. Черных О. А., Петрова Т. Н. Металлы // Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб. 2002. С. 86 – 93.
5. Черных О. А., Петрова Т. Н. Распределение металлов в заливах северного побережья Ладожского озера // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. Тр. Международной конференции «Экологическое состояние континентальных водоемов Арктической зоны в связи с промышленным освоением северных территорий». СПб., «Наука», «ВВМ». 2005. С. 221-226.
6. Расплетина Г. Ф., Кулиш Т. П., Петрова Т. Н. Гидрохимическая характеристика рек – притоков Ладожского озера и р. Невы // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / Под ред. Трифионовой И. С. СПб.: Изд-во «Лема». 2006. С.11-35.

7. Сусарева О. М., Петрова Т. Н. Металлы // Ладога. СПб., 2013. С.222-227.

8. Гусаков Б. Л., Тержевик А. Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Петровой Н. А., Тержевика А. Ю. СПб.: Наука, 1992. С. 21-26.

## **PECULIARITIES OF DISTRIBUTION OF SOME METALS IN WATER OF LAKE LADOGA AND ITS TRIBUTARIES**

Tatiana Nikolaevna Petrova,  
scientist researcher Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,

E-mail: [tatianik@mail.ru](mailto:tatianik@mail.ru),

Maria Andreevna Guseva,  
scientist researcher Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,

E-mail: [velependere@gmail.com](mailto:velependere@gmail.com)

*Abstract:* This paper examines the results of long-term observations of changes in the concentrations of metals such as iron, aluminum, manganese, copper and lead in the water of Lake Ladoga and its tributaries. Shown differences in their content in the water of rivers, belonging to different parts of the catchment and characteristic properties their spatial distribution in the lake.

*Keywords:* Metals, Lake Ladoga, tributaries, iron, aluminum, manganese, copper, lead

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ СУБМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ БАССЕЙНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Шамиль Рауфович Поздняков,  
д.г.н., директор ИНОЗ РАН  
e-mail: [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)

Владислав Александрович Румянцев,  
академик РАН, научный руководитель ИНОЗ РАН  
e-mail: [lake@limno.org.ru](mailto:lake@limno.org.ru)

Екатерина Викторовна Иванова  
к.г.н., научный сотрудник ИНОЗ РАН  
e-mail: [spb.spt@mail.ru](mailto:spb.spt@mail.ru)

*Аннотация:* В работе проведен анализ содержания и количества частиц в пределах части субмикронного диапазона (от 20 до 300 нм) на основных притоках Ладожского и Онежского озер, а также озера Ильмень и на некоторых частях акватории Ладожского озера. В результате высказано предварительное заключение о наличии определенного постоянства размерных характеристик, присущих взвешенным в воде частицам субмикронного диапазона для конкретных водотоков, расположенных в различных частях водосбора. На основании ряда обнаруженных корреляций выдвинута гипотеза о возможности определения генезиса вод, попадающих в Ладогу из различных частей водосбора и оценки перемещения их к замыкающему створу в истоке р.Невы в различные сезоны года с учетом гидродинамических особенностей озера.

*Ключевые слова:* гидрология, экология, частицы субмикронного диапазона, анализатор подвижности частиц, гидродинамический режим

В толще естественных водных объектов содержатся твердые частицы разной природы и широкого размерного диапазона, включая субмикронный (менее 1 мкм). Важнейшей особенностью частиц этого диапазона является способность оставаться неопределенно долгое время во взвешенном состоянии вследствие их низких значений гидравлической крупности [4]. При этом считается, что с уменьшением размера частиц их количество в природных водах возрастает экспоненциально [6]. Таким образом, представляется крайне вероятным содержание значительного количества частиц субмикронного диапазона в водоемах и водотоках.

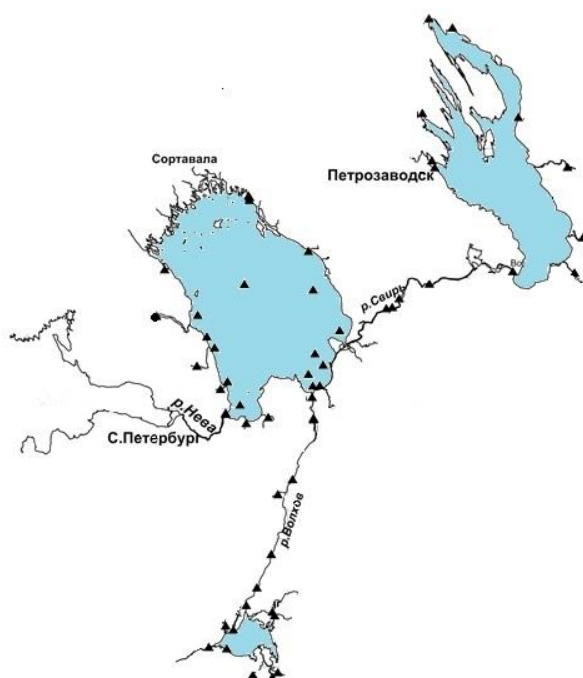
Изучение характеристик и особенностей частиц субмикронных размеров имеет большое научное и практическое значение. В частности, благодаря уникальным свойствам, открываются новые возможности их использования во многих отраслях, например, в медицине. Определенные частицы также могут быть использованы для очистки воды. Специальные исследования показали, что частицы железа субмикронного диапазона можно использовать для очистки воды от пестицидов и промышленных химикатов. При взаимодействии пестицидов с частицами железа, пестициды распадаются на безвредные компоненты. Причем интересно то, что именно размер частиц здесь имеет решающее значение. Так, если в реакцию вступают частицы железа размером крупнее, чем субмикронный, данные эффекты практически не проявляются.

С другой стороны, в природных водах зачастую содержится огромное количество вредных для здоровья искусственных частиц субмикронного диапазона, различных полимеров, а также фармацевтических веществ. Так, например, исследования, проведенные в Балтийском море, выявили большие концентрации фармацевтических веществ в организмах рыб, приближенные к содержанию данных веществ в организме человека, употребляющего лекарство. Особенностью частиц субмикронного диапазона является то, что они легко проникают во внутренние органы живых организмов, что может оказать негативное влияние на здоровье. В этой связи, возникает необходимость их мониторинга в условиях естественных водных объектов и, особенно, в районах, непосредственно соседствующих с водозаборами питьевого водоснабжения населенных пунктов.

В рамках данной работы проводились исследования частиц субмикронного диапазона на водосборе крупнейшего пресноводного озера Европы – Ладожского озера, а конкретно, на основных притоках Ладожского и Онежского озер и озера Ильмень. При этом, особое внимание было уделено району бухты Петрокрепость, так как именно в этом районе формируются водные массы, поступающие в Неву, и откуда, ниже по течению, вода попадает непосредственно в водозаборы Санкт-Петербурга. Поэтому крайне важным представляется анализ возможности прямого поступления вод и взвешенных в них частиц с различных участков водосбора Ладожского озера в исток реки Нева в различные сезоны года.

#### **Материалы и методы исследования**

В 2013 – 2015 гг. Институтом озероведения РАН был проведен ряд экспедиционных работ, целью которых являлось определение количества и распределения размеров частиц субмикронного диапазона, взвешенных в толще водных объектов бассейна Ладожского озера и в истоке реки Нева. Карта-схема отборов проб воды для соответствующих анализов представлена на рисунке 1.



*Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды со взвешенными наносами на водосборе Ладожского озера.*

Отборы проб были выбраны на основных притоках Ладожского и Онежского озер, а также озера Ильмень и некоторых частях акватории Ладоги.

Вследствие малой гидравлической крупности частиц субмикронного диапазона, стандартные методы измерения их размеров, применяемые в классической гидрологии для частиц крупнее 1 мкм (например, использование стандартного фракциометра или пипеточной установки), в данном случае оказываются неприемлемыми. В тоже время, сейчас для оценки размеров частиц субмикронного диапазона в природных водных объектах начали применяться методики, используемые в других областях исследований. Каждая из них имеет как преимущества, так и недостатки, применительно к конкретной цели работы. На основе проведенного анализа был выбран метод, основанный на принципе оценки различной подвижности частиц в электрическом поле в зависимости от их размера. Анализ проводился при помощи сканирующего анализатора подвижности частиц (SMPS), модель 3936 [5] ([www.tsi.com](http://www.tsi.com)). Размеры частиц определяются исходя



из распределения их электрической подвижности [1]. Исходя из возможностей использовавшегося в данной работе прибора, анализ проводился в узком спектре размеров от 2 нм до 300 нм.

### Результаты исследования

Прежде всего, выяснилось, что для обследованного бассейна в пределах одного водотока, вариации количества частиц субмикронного диапазона по сезонам, в большинстве случаев, оказались несущественными. Данный вывод является предварительным и, возможно, его нельзя считать универсальным и присущим для других условий и периодов времени. Однако данный факт позволил выполнить сравнительные анализы количества частиц субмикронного диапазона при переходе от одного водотока к другому.

На рис. 2 приведены примеры распределения количества частиц субмикронного диапазона для рек северной и западной частей водосбора Ладожского озера (реки Бурная и Тулема), восточной его части (реки Свирь и Оять) и южной (реки Сясь и Волхов). Данные водотоки существенно отличаются размерами друг от друга и были выбраны как характерные для разных участков водосбора.

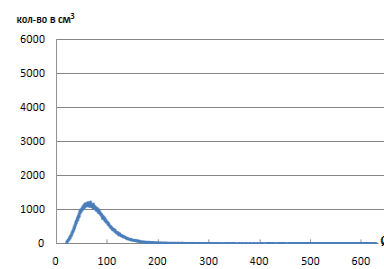
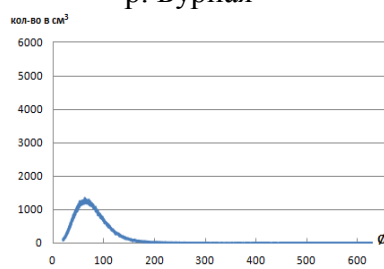
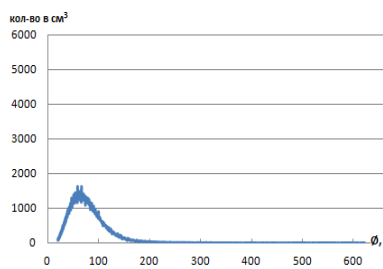
Вместе с тем, как показывает анализ, при переходе от одного водного объекта к другому наблюдаются весьма значительные колебания количества частиц, достигающие практически до 400%. Низкие показатели количества частиц субмикронного диапазона наблюдаются на притоках, расположенных на северных, восточных и западных берегах Ладожского озера, а также на притоках Онежского озера. Максимальные значения зафиксированы на южных притоках Ладожского озера, на притоках озера Ильмень, и на всем протяжении р.Волхов. При этом в пределах одного водотока имеет место определенное постоянство количества частиц по длине водотока. Это отмечалось как на 6-ти створах р.Волхов, так и на 6-ти створах р.Свирь. В результате можно сделать вывод об относительном постоянстве содержания количества частиц субмикронного диапазона в условиях конкретного водотока, независимо от сезона года. При этом, данные, полученные по 5-ти станциям в районе бухты Петрокрепость, показывают значительные внутрисезонные колебания количества частиц субмикронного диапазона, достигающие до 370%.

Весна

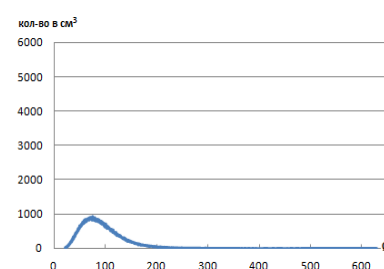
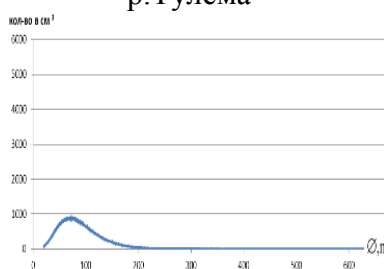
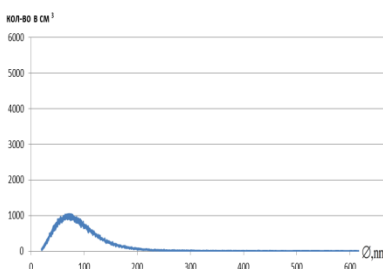
Лето

Осень

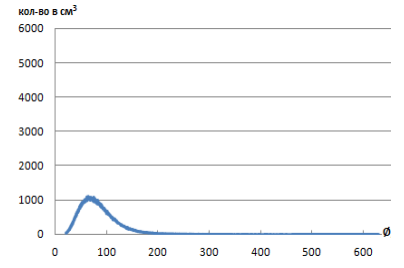
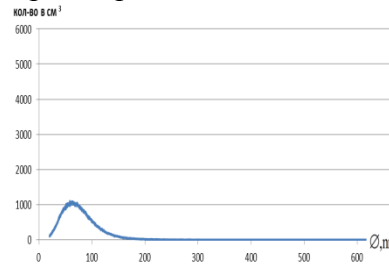
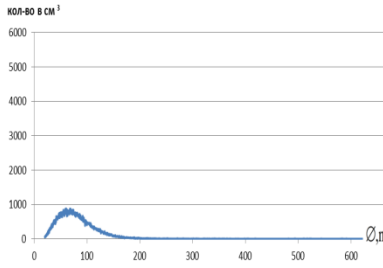
### Северная и Западная часть водосбора р. Бурная



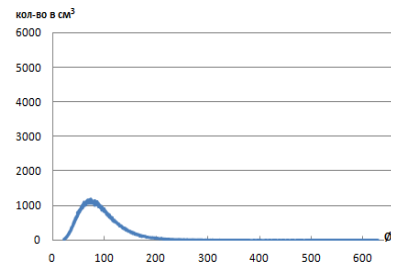
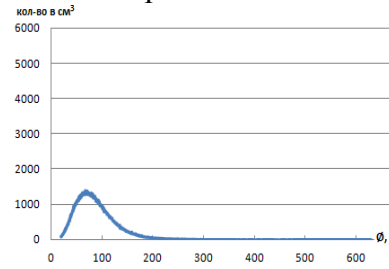
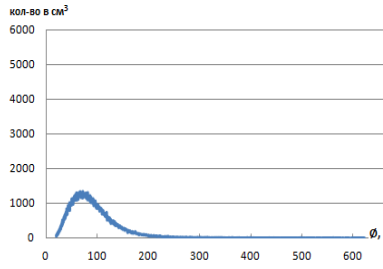
### р. Тулема



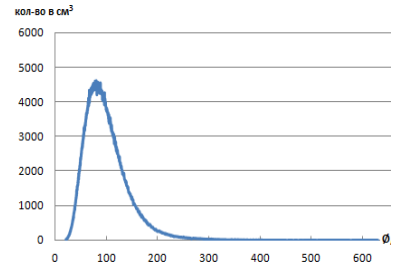
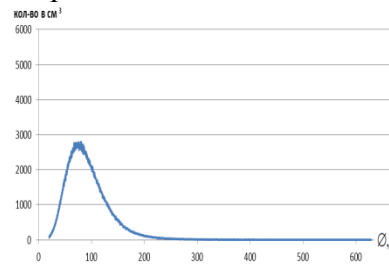
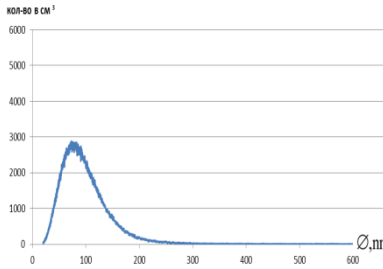
*Восточная часть водосбора  
р. Свирь Лодейное поле*



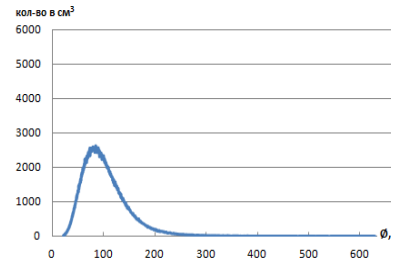
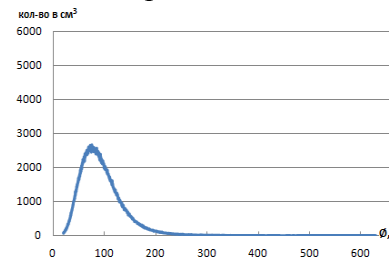
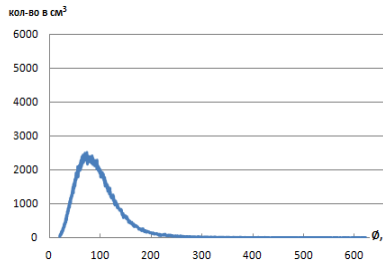
*р. Оять*



*Южная часть водосбора  
р. Волхов после ГЭС*

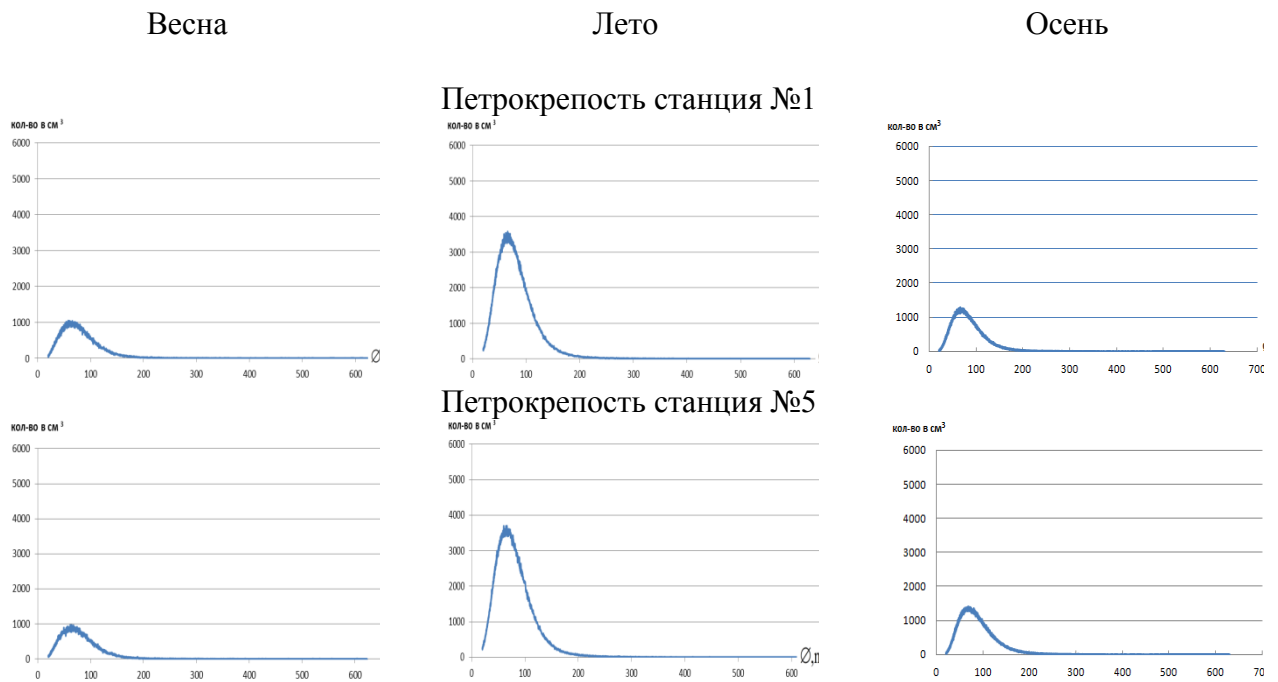


*р. Сясь*



*Рис.2. Распределение крупности частиц в диапазоне 2 - 300 мкм на некоторых водотоках в бассейне Ладожского озера.*

Таким образом, можно предположить, что указанные колебания связаны с преобладанием водных масс, приносимых в данный район Ладожского озера из разных частей бассейна в различные сезоны года. Для примера приведены данные с двух станций бухты Петрокрепость (рис.3).



*Рис.3. Кривые дифференциального распределения крупности частиц в диапазоне 2-300 нм на некоторых станциях в районе бухты Петрокрепость.*

### **Обсуждение результатов**

Выполненные к настоящему времени гидродинамические исследования на акватории Ладожского озера показывают, что для каждого сезона года отчетливо выделяются определенные закономерности распространения вод притоков, поскольку зоны их влияния на акватории озера отражают систему течений, подверженную сезонным изменениям [2]. Система геострофических течений, периодически нарушаемая сгонно-нагонными явлениями и ветровыми течениями, а также наличие подсасывающего эффекта со стороны р. Невы формирует пеструю картину течений в юго-восточной части озера и в бухте Петрокрепость. При этом выделяется следующие закономерности. В весенний период под влиянием геострофических течений вдоль западного берега озера образуется устойчивое течение, направленное к истоку р. Невы. При ветрах северного, северо-восточного и западного румбов направление поверхностных ветровых течений, совпадают с геострофическими и усиливают их. Летом, при устойчивом ветре с восточной составляющей, в озере, может образоваться антициклоническая циркуляция воды. Она способствует перемещению водных масс из южной части озера в западном направлении. При продолжительном воздействии ветра эти воды заполняют бухту Петрокрепость и поступают в реку Неву [3].

В осенний период, особенно в октябре-ноябре, наступает значительное уменьшение скорости плотностных течений. Для этого периода характерно преобладание ветровых течений, которые зависят от направления ветра, его силы и продолжительности действия.

На основании приведенного анализа можно сделать следующие выводы о попадании вод с различных участков бассейна в исток р. Невы.

Возможность прямого поступления вод к истоку р. Невы с Онежско - Свирского вторичного водосбора в большинстве случаев маловероятна. Основными причинами этого являются продолжительное время добегания основных вод по акватории озера до истока реки Свирь. В свою очередь по акватории Ладожского озера воды реки Свирь распространяются на север вдоль его восточного берега в течение всего года и даже под влиянием крупномасштабных ветровых циркуляций их попадание в исток реки Невы крайне затруднено.

Большая часть обследованных участков собственно Ладожского водосбора в восточной и северной частях, находятся на большом удалении от истока реки Нева. Поэтому смешение их вод с основной водной массой озера с учетом продолжительности времени добегания по его акватории также исключает возможность прямого попадания в исток реки Невы. Кроме того, воды притоков восточного берега озера, как и воды реки Свирь распространяются вдоль восточного берега на север в течение всего года.

Таким образом, можно утверждать, что в весенний период в бухту Петрокрепость частицы субмикронного диапазона в основном попадают непосредственно от западных притоков Ладожского озера. Это обусловлено имеющей место в данный период времени установившейся господствующей циркуляцией вод. Данный вывод полностью подтверждается результатами количественной оценки частиц субмикронного диапазона в бухте Петрокрепость весной, совпадающей с количеством частиц на соответствующих притоках.

В летний период имеет место поступление за счет притоков озера Ильмень и реки Волхов. При этом данные воды в результате преимущественно ветрового воздействия рассеиваются по различным направлениям на акватории Ладожского озера из района, непосредственно примыкающего в устье р.Волхов. В связи с тем, что из бассейна озера Ильмень поступает большее количество частиц субмикронного диапазона, превышающее на 300-350% количество частиц, поступающее с других частей бассейна Ладожского озера, на станциях Петрокрепостной губы также наблюдается превышение количества частиц в летний период на 300-350%. При этом эффектом ветро- волнового взмучивания частиц со дна южной части Ладожского озера можно пренебречь, поскольку донные отложения здесь имеют, как правило, крупнофракционный характер. Это позволяет сделать вывод о преимущественном попадании частиц в данный период времени из бассейна реки Волхов в исток реки Нева.

В осенний период преобладающим фактором является ветер. В данном случае в дни отбора проб в конце ноября 2015г отмечался юго-западный ветер, который предположительно принес в исток реки Нева воды западных притоков (рис.3).

#### **Выводы**

Большой пространственный охват и соблюдение условий однородности выполнения анализов позволило обеспечить сравнимость результатов для выделенного диапазона размеров частиц с различных участков бассейна. В результате можно сделать предварительный вывод о наличии некоторого постоянства размерных характеристик, присущих взвешенным в воде частицам субмикронного диапазона для конкретных водотоков, расположенных в различных частях водосбора Ладожского озера и их корреляции с такими же характеристиками в южной части акватории озера в непосредственной близости от истока р.Нева. При этом не отмечается какой-либо трансформации этих характеристик в водной массе вблизи истока реки Нева.

Данное исследование можно считать пилотным, посвященным анализу формирования, состава и структуры взвешенных в воде частиц субмикронного диапазона в условиях пресноводных объектов.

Объем данного исследования нельзя считать достаточным для формирования обобщающих суждений и закономерностей. Для этого необходимы более продолжительные и детальные исследования. Важно отметить, что получаемая в результате натурная информация о природе и динамике частиц субмикронного диапазона может обеспечить более глубокое понимание процессов, связанных с формированием экологического состояния водных объектов.

#### **Благодарность**

Выражаем благодарность РЦ "Геомодель" (Санкт-Петербургский Государственный Университет, Физический факультет), за помощь в проведении лабораторных исследований.

#### **Литература:**

1. Калечиц В. Нанотехнология: измерение параметров частиц // Наноиндустрия, выпуск 5, 2010 г. – с. 70-75.
2. Крючков А. М. Распространение вод притоков на акватории озера. Ладога, ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб. Нестор-История, 2013. - с. 168-175.

3. Крючков А. М. Влияние динамики вод Ладожского озера на формирование водной массы р.Невы. Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 180.
4. Румянцев В. А., Крюков Л. Н., Поздняков Ш. Р., Рыбакин В. Н. Природные и техногенные нанообъекты Ладожского озера. СПб, «Общество. Среда. Развитие», 2010. - № 3. – С. 229 – 232.
5. Scanning Mobility Particle Sizer™SpectroMeter (SMPS) Model 3936. <http://www.tsi.com>
6. Peternelj Andreja Size and Charge of Particles in Surface Waters. Master Thesis, Water and Environmental.Engineering Department of Chemical Engineering, Lunds University, Sweden, 2009. – 73 P.

## **ASSESSMENT OF SUBMICRON PARTICLES QUANTITY IN THE WATER OBJECTS OF THE LADOGA LAKE CATCHMENT AREA**

Shamil Raufovich Pozdnyakov

Dr., Director

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)

Vladislav Aleksandrovich Rumyanzev,

Academician, Chief scientific Adviser

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail [lake@limno.org.ru](mailto:lake@limno.org.ru)

Ekaterina Viktorovna Ivanova,

PhD, researcher

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [spb.spt@mail.ru](mailto:spb.spt@mail.ru)

*Abstract:* We performed the assessment of submicron particles quantity (from 20nm to 300nm) in the main inflowing streams of the Ladoga Lake, Onega Lake, Ilmen Lake and on some parts of the Ladoga Lake water area. We make a preliminary conclusion about stability of submicron particles quantitative characteristics in the concrete water streams. On the base of various correlations, it was made a hypothesis about possibility to determine water genesis that comes to the Ladoga Lake from different parts of the catchment area and moves to the headwater of the Neva River in different seasons, with hydrodynamic-specific.

*Keywords:* hydrology, ecology, submicron particles, scanning mobility particle sizer spectrometer, hydrodynamic regime

## РТУТЬ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Вера Игоревна Полетаева,

к.г.-м.н.

ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

E-mail: [alieva@igc.irk.ru](mailto:alieva@igc.irk.ru)

Михаил Владимирович Пастухов,

к.б.н.

ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

E-mail: [mpast@igc.irk.ru](mailto:mpast@igc.irk.ru)

*Аннотация:* Представлены результаты мониторинговых работ по изучению техногенного загрязнения экосистемы Братского водохранилища. Рассмотрено накопление и распределение ртути по латерали водоема, а также особенности вертикального распределения токсиканта в кернах донных отложений заливов.

*Ключевые слова:* ртуть, донные отложения, водохранилище

В формировании качества водной среды важную роль играют оседающие взвешенные частицы и донные отложения, которые с одной стороны способствуют самоочищению водной среды, а с другой при определенных условиях превращаются в источник вторичного загрязнения водоема. Актуальность изучения химического состава донных отложений водохранилищ определяется их использованием в целях питьевого и рыбохозяйственного назначения. Одним из таких водоемов является Братское водохранилище, созданное подпором вод р. Ангары.

Самой масштабной экологической проблемой региона является ртутное загрязнение экосистемы Братского водохранилища, вызванное многолетней (1972-1998 гг.) техногенной эмиссией этого поллютанта со сточными водами, расположенного на р. Ангаре цеха ртутного электролиза предприятия «Усольехимпром». За 28 лет работы химкомбината суммарные выбросы ртути превысили 1 700 т [1], из них в Братское водохранилище попало по разным данным от 63 до 86 т ртути [1, 2]. В литературе приводятся данные по изучению ртутного загрязнения компонентов окружающей среды Приангарья в разные периоды техногенного воздействия [2-4]. Показано, что закрытие цеха не привело к полному искоренению проблемы, т.к. сохраняются большие объемы ртути, накопленные за период работы «Усольехимпром» в грунтах и почвогрунтах промплощадки, а также в донных отложениях Братского водохранилища. Целью работы стало охарактеризовать степень загрязнения донных осадков в современный период, что является особенно актуальным в период планируемых работ по демеркуризации цеха ртутного электролиза, а, следовательно, и повышение экологического риска, связанного с дополнительной техногенной эмиссией ртути.

Опробование донных отложений Братского водохранилища проводилось на участке г. Усолье-Сибирское – пос. Молька (протяженность участка около 130 км). Паводковые отложения (наилки) в районе сбросов сточных вод отбирались в прибрежной зоне пластиковым совком. В глубокой части водохранилища донные отложения отобраны с помощью трубкой ГОИН-1. Ртуть в воде определялась атомно-абсорбционным методом на приборе РА-915<sup>+</sup> с приставкой РП-91 (аналитик Андрулайтис Л.Д.). Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

Поступление сточных вод предприятия «Усольехимпром» происходило с организованными промышленно-ливневыми выпусками (выпуск 1 и 2) и дренажной канавой – искусственным водотоком, дренирующим шламохранилище комбината и выводящим из него излишки воды. После ликвидации цеха ртутного электролиза (1998 г.), началось снижение темпов производства. Начиная с 2008 г. дебит основных сточных вод предприятия (выпуск 1, выпуск 2 и дренажная

канавы) поэтапно уменьшался. В 2013 г. производственные мощности предприятия были практически остановлены. С 2014 г. в водоем не поступали сточные воды выпусков 1 и 2, а с 2015 г. – дренажной канавы.

В настоящее время высокие концентрации ртути в аллювиальных отложениях по-прежнему приурочены к местам сброса организованных выпусков (1,7-2,9 мг/кг). Эти концентрации значительно ниже, зафиксированных в 2009 г. вблизи выпусков (до 9 мг/кг) и дренажной канавы (6 мг/кг) [3], хотя и не достигают региональных значений. Последствия техногенного загрязнения можно оценить, сопоставив их с распределением ртути в расположенном выше по р. Ангаре и находящимся вне зоны техногенеза – Иркутским водохранилищем, в котором содержание токсиканта в донных отложениях не превышает 0,1 мг/кг.

Высокие концентрации ртути, отмеченные в воде р. Ангары в районе выпусков в период полной остановки работы предприятия, указывают на продолжающееся поступление токсиканта в водоем с поверхностным стоком (атмосферные осадки, талые воды, поверхностный смыв с территории предприятия, инфильтрационные утечки из шламоотстойника) и сточными водами ГЗУ (канавы гидрозолоудаления), с которыми после разрушения конструкции трубы смешивались сточные воды выпуска № 1 с 2008 г. Поступление продуктов техногенеза в водоем продолжается и из находящейся в критическом состоянии коллекторной системы «Усольехимпром», в которой за годы работы накоплено большое количество загрязняющих веществ. Так внутри трубы выпуска №1 сконцентрирован осадок с содержанием ртути до 8,8 мг/кг. По данным [5] в нижней части водотока дренажной канавы концентрация Hg в донных отложениях достигает 100 мг/кг, при этом были обнаружены следующие формы ртути: свободная, физически сорбированная, хемосорбированная, изоморфно входящая в состав других минералов.

На миграцию ртути в водоемах большое влияние оказывает сорбция ее взвешенными частицами с их последующей седиментацией. Результаты мониторинговых работ показывают снижение как средних, так и максимальных концентраций ртути в поверхностном слое донных отложений участка г. Усолье-Сибирское – пос. Молька (рис.1). Однако, четко выраженной тенденции к уменьшению концентраций ртути в донных осадках во времени не наблюдается, что связано в первую очередь со сменой уровня режима водоема, при колебании которого ртуть может поступать из нижних, более загрязненных слоев осадка. Отметим, что в период с 2012 г. началось заполнение четвертого водохранилища Ангарского каскада ГЭС – Богучанского, что привело к значительному уменьшению уровня Братского водохранилища.

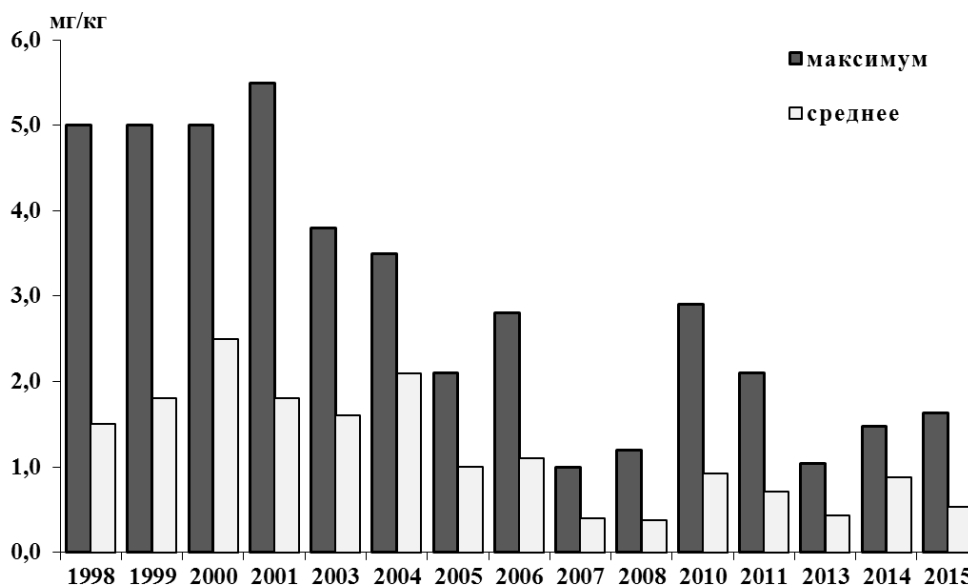


Рис. 1. Содержание ртути в поверхностном слое донных отложений верхней части Братского водохранилища.

В районе г. Свирск (зона подпора Братского водохранилища) происходит уменьшение скорости течения и падение транспортирующей способности водного потока, и, как следствие, механическое осаждение большей части взвесей, активное накопление и дифференциация осадочного материала по гранулометрическому и минеральному составу тяжелой фракции [6]. По нашим данным, в этом районе мощность донных отложений составляет 34 см. В 15 км ниже (районе о. Конный) выделен основной седиментационный барьер Братского водохранилища, длина кернов на этом участке варьирует от 79 до 105 см. Далее по русловой части темпы седиментации снижаются, осадок не превышает 30 см.

Высокая скорость осадконакопления на седиментационном барьере Братского водохранилища способствует сбросу и закреплению основной массы техногенных элементов. Анализ вертикального распределения ртути в донных осадках этого района показал, что поверхностные горизонты (0-10 см) менее обогащены ею по сравнению с средними частями керна, где содержание токсиканта достигает 10,1 мг/кг (рис. 2). Распределение ртути по глубине донных отложений указывает на особенности процесса осадконакопления и временной тренд техногенного загрязнения Братского водохранилища. Значительные концентрации Hg соответствуют годам интенсивной работы предприятия «Усольехимпром», далее, по мере сокращения проводимых на комбинате работ, они перекрываются осадками с меньшими содержаниями токсиканта. Существенную роль в распределении концентраций Hg в донных осадках водохранилища играют крупные притоки, р.р. Иркут, Белая, Китой, которые во время паводков привносят большое количество терригенной взвеси, адсорбирующей растворенные формы ртути, что способствует её последующему захоронению в осадках водохранилища. По данным профильного опробования определено, что большая часть депонированной ртути сосредоточена в донных отложениях средней части седиментационного барьера водохранилища. Меньшая интенсивность накопления Hg в краевых частях барьера определяется, в основном, морфологическими характеристиками этого участка (рис. 2).

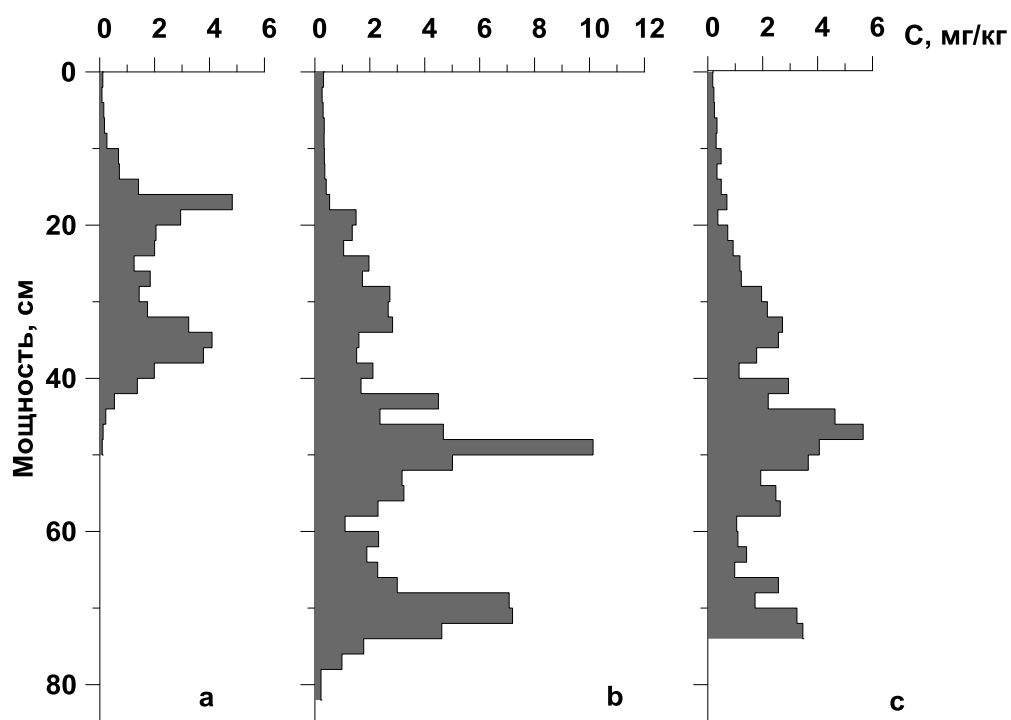


Рис. 2. Концентрация ртути в донных отложениях основного седиментационного барьера Братского водохранилища (a – левая часть, b – середина, c – правая часть).



Существенные различия в накоплении ртути наблюдаются и по акватории водоема. Так, в 25 км ниже о. Конный в донных отложениях происходит снижение ее концентраций (0,13-1,52 мг/кг), однако, еще через 10 км содержание Hg вновь значительно увеличивается (1,47-6,81 мг/кг). Такое повышение концентраций Hg связано с процессами перераспределения токсиканта в системе «вода – взвесь – донный осадок».

Таким образом, после закрытия цеха ртутного электролиза основная часть ртути, поступившей в водоем за время работы комбината, депонирована в донных осадках водоема. Опасность заключается в нестабильном уровне водохранилища, при изменении которого захороненная ртуть может поступать в верхние слои донных отложений, что приведет к вторичному загрязнению водной массы водоема.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00891 А.

#### Литература:

1. Гайдуков Н. В. Результаты и перспективы работ по снижению ртутного загрязнения Братского водохранилища и промплощадки ОАО «Усольехимпром». / Тезисы доклада Международной конференции. Иркутск. – 2000. – С. 21.
2. Коваль П. В., Руш Е. А., Удодов Ю. Н., Королева Г. П., Андрулайтис Л. Д., Зарипов Р. Х. Геоэкология: воздействие сосредоточенного источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья // Инженерная экология. – 2004. – № 4. – С. 18-45.
3. Алиева (Полетаева) В. И., Бутаков Е. В., Пастухов М. В., Андрулайтис Л. Д. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 431-438.
4. Пастухов М. В. Экологические аспекты аккумуляции ртути гидробионтами Байкало-Ангарской водной системы: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Иркутск. – 2012. – 22 с.
5. Таусон В. Л. Уровни содержания, характер распределения и формы нахождения ртути как индикаторы источников ртутного загрязнения природной среды / В.Ф. Гелетий, В.И. Меньшиков // Химия в интересах устойчивого развития. – 1995. – № 3. – С.151-159.
6. Карнаухова Г.А., Сквитина Т. М. Особенности минерального состава донных отложений в барьерной зоне реки Ангары // География и природные ресурсы. – 2012. – № 1. – С. 151-155.

### MERCURY IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE UPPER PART OF BRATSK WATER RESERVOIR

Vera I. Poletaeva,  
Candidate of geological and mineralogical sciences  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [alieva@igc.irk.ru](mailto:alieva@igc.irk.ru)  
Mikhail V. Pastukhov,  
Candidate of biological sciences  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [mpast@igc.irk.ru](mailto:mpast@igc.irk.ru)

*Abstract:* The article presents the results of monitoring studies of the technogenic pollution in Bratsk water reservoir ecosystem. In the studies we observed characteristics of mercury accumulation and distribution in the water reservoir as well as specifics of vertical distribution of the toxicant in the core of bottom sediments were considered.

*Keywords:* mercury, bottom sediments, water reservoir

## МНОГОЛЕТНИЕ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Полина Владимировна Постникова,  
к.ф.–м. н., научный сотрудник  
отдела вычислительных моделей в гидрофизике  
ФГБУПН «Институт вычислительного моделирования»

E-mail: [polina@icm.krasn.ru](mailto:polina@icm.krasn.ru)

Галина Владимировна Макарская,  
к.б. н., старший научный сотрудник  
отдела вычислительных моделей в гидрофизике  
ФГБУПН «Институт вычислительного моделирования»

E-mail: [mgv@icm.krasn.ru](mailto:mgv@icm.krasn.ru)

Анатолий Дмитриевич Апонасенко,  
д.ф. –м. н., ведущий научный сотрудник  
отдела вычислительных моделей в гидрофизике  
ФГБУПН «Институт вычислительного моделирования»

E-mail: [apon@icm.krasn.ru](mailto:apon@icm.krasn.ru)

Юлия Андреевна Пономарева,  
к.б. н., младший научный сотрудник  
отдела вычислительных моделей в гидрофизике  
ФГБУПН «Институт вычислительного моделирования»

E-mail: [ponomarevayulia@mail.ru](mailto:ponomarevayulia@mail.ru)

*Аннотация:* Современные исследования представлены за период 2000-2015 гг. Целью настоящей работы было изучение межгодовых изменений гидробиологических показателей, а также оценка количественных и функциональных характеристик фито- и бактериопланктона. В работе представлены распределения концентрации хлорофилла «а» и фотосинтетической активности фитопланктона, а также численность и биомасса фито и бактериопланктона, первичная продукция и бактериальная продукция, динамика биохимического потребления кислорода как показатели устойчивости функционирования Красноярского водохранилища

*Ключевые слова:* растворенное органическое вещество, биохимическое потребление кислорода, первичная продукция, бактериальная продукция, фотосинтетическая активность фитопланктона, концентрация хлорофилла «а»

Биопродуктивность водоемов и качество воды в значительной мере определяются структурой и функционированием водной экосистемы. Зарегулирование реки Енисей каскадом ГЭС сформировало на протяженных ее участках крупные глубоководные водохранилища, по своим гидрологическим характеристикам, приближающимся к озерному типу, уровень воды в которых изменяется не только по естественным климатическим причинам, но и регулируется искусственно. При этом нарушились не только привычные пути миграции ценных пород рыб, но и изменилась их кормовая база, условия обитания фито-, бактерио-, зоопланктона, зообентоса. Постоянные мониторинговые наблюдения дают возможность своевременно разрабатывать мероприятия и осуществлять водоохранные работы на основе научно-обоснованных положений по современному состоянию экосистемы и динамике ее гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов с учетом многолетних рядов наблюдений [1].

Целью настоящей работы было изучение межгодовых изменений гидробиологических и гидрооптических показателей, характеристик биохимического потребления кислорода, а также оценка количественных и функциональных характеристик фито и бактериопланктона, в Красноярском водохранилище.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбрано Красноярское водохранилище - глубоководный и слабопроточный искусственный водоем, созданный на Енисее при строительстве Красноярской ГЭС, который функционирует более 40 лет и представляет собой уникальный искусственный водоем. Мониторинговые исследования экосистемы водохранилища проводили с 2000 по 2015 гг. в течение вегетационного периода, как по всей акватории водохранилища, так и в его центральной части – Приморский плес.

С помощью дифференциального спектрофотометра ДСФГ-2 были оценены стандартные характеристики качества воды, как в самом водохранилище, так и в наиболее существенных его заливах: количество минеральной и органической взвеси, а также содержание растворенных органических веществ, сняты размерные характеристики частиц, присутствующих в пробах, определены основные гидрооптические показатели. Изучение горизонтального распределения концентрации хлорофилла «а», а также фотосинтетической активности фитопланктона выполнено с помощью лабораторного флуориметра ЛФЛ-И [2].

Пробы фитопланктона отбирали с борта лодки или судна в подповерхностном слое батометром Рутнера, микробиологические пробы с этого же горизонта – стерильными склянками.

Общую численность бактерий определяли с использованием эпифлуоресцентной микроскопии с красителем флуорескамин (микроскоп типа МЛ-2Б) [3]; время генерации и суточную бактериальную продукцию – в модификации прямого счета по изменению числа бактерий в фильтрах через полиядерные фильтры с диаметром пор 4.5 мкм [4].

Фитопланктон концентрировали на мембранные фильтры Владипор с диаметром пор 0.9 мкм. Степень сложности альгоценозов рассчитывали по разнообразию их структуры через индекс Шеннона  $H_b$  по биомассе. Первичную продукцию определяли в кислородной модификации методом склянок при суточной инкубации; расчеты удельной первичной продукции - на единицу биомассы фитопланктона. Биохимическое потребление кислорода определяли в 6-8-и суточных экспериментах стандартным методом склянок в кислородной модификации в трех повторностях [5].

## Результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлена динамика изменения концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности фитопланктона для центральной части Красноярского водохранилища (Приморский плес).

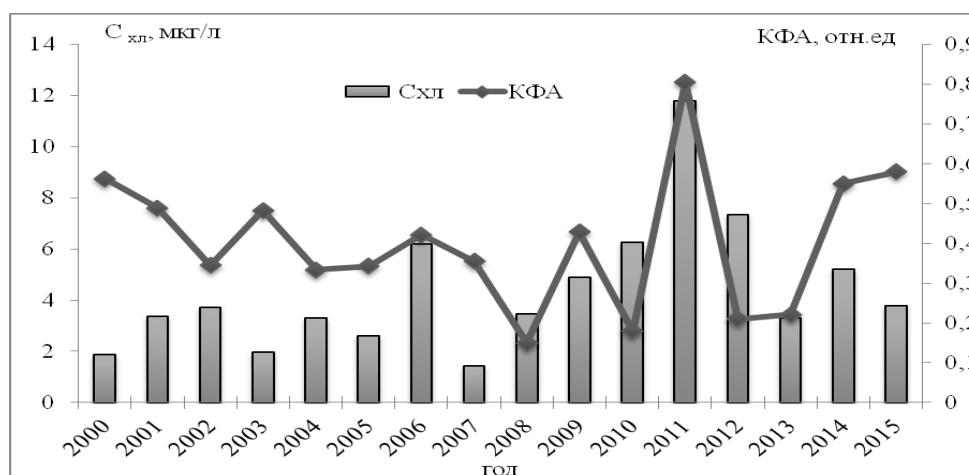


Рис. 1. Межгодовая динамика концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности фитопланктона для центральной части Красноярского водохранилища.

Содержание хлорофилла «а» и фотосинтетическая активность фитопланктона имеют обратную зависимость на протяжении всего периода измерений за исключением 2011 года, когда наблюдался значительный рост обоих параметров. В это же время, по данным

гидробиологических измерений наблюдался пик численности и биомассы фитопланктона при постоянном возрастании, начиная с 2007 года.

Межгодовое сравнение результатов проводили сопоставлением данных при различном уровне максимального наполнения водохранилища водой (м). Маловодными годами (максимальный уровень воды ( $H_{\max}$ ) до 236 м) были 2002, 2003, 2008, 2012, 2014 и 2015 гг., средневодными ( $H_{\max}$  до 238 м) – 2000, 2005, 2007, 2009, 2011 и 2013 гг. и многоводными ( $H_{\max}$  до 246 м) – 2001, 2004, 2006, 2010 гг.. Отмечено, что содержание растворенного органического вещества коррелирует с уровнем наполнения водохранилища, а концентрация минеральной взвеси - имеет обратную зависимость.

Результаты мониторинга за последние 15 лет центральной части Красноярского водохранилища в летний период выявили изменение количественных характеристик бактериопланктона от июня к августу от  $1,73 \pm 0,04$  до  $1,32 \pm 0,06$  млн. кл/мл [6]. В маловодные годы в самом водохранилище уменьшение численности бактериопланктона отмечено от июня ( $2,03 \pm 0,10$ ) к августу ( $0,85 \pm 0,09$ ) и в заливах ( $1,77 \pm 0,09$  и  $1,18 \pm 0,10$  млн. кл/мл соответственно) было достоверно различимым. В межгодовой динамике отмечалось увеличение бактериопланктона от маловодных лет ( $1,59 \pm 0,05$ ) к средневодным ( $1,61 \pm 0,03$ ) и многоводным годам ( $1,70 \pm 0,05$  млн. кл/мл) (рис.1). Достоверные отличия численности бактериопланктона отмечены в средневодные годы в сторону увеличения в заливах ( $1,65 \pm 0,07$  и  $1,77 \pm 0,07$ ) в сравнении с водохранилищем ( $1,41 \pm 0,06$  и  $1,33 \pm 0,07$  млн. кл/мл соответственно в июне и июле).

Бактериальная продукция в маловодные годы ( $0,019 \pm 0,002$  мгС/л) достоверно отличалась ( $t_{st}=2,42$  против  $t_{st(\text{табл})}=2,03$ ) от данных в средневодные ( $0,028 \pm 0,003$ ) с недостоверным отличием в многоводные ( $0,023 \pm 0,002$ ). В межгодовое различие бактериальной продукции основную долю вносили июньские показатели многоводных лет ( $0,030 \pm 0,005$ ) с их достоверными отличиями в сравнении с августом ( $0,012 \pm 0,001$  мгС/л). Средневодные ( $0,023 \pm 0,005$  и  $0,29 \pm 0,003$ , июнь и июль) и маловодные ( $0,024 \pm 0,003$  и  $0,013 \pm 0,004$  мгС/л в июне и августе) годы характеризовались более равномерным распределением этих показателей в внутрисезонной динамике. Июль в средневодные годы  $K_2$  ( $0,19 \pm 0,02$ ) достоверно отличался от данных остальных лет и месяцев исследования. В внутрисезонной динамике отмечалось уменьшение  $K_2$  от июня к августу, так в июне  $K_2$  был в пределах  $0,11 \pm 0,01$  (многоводные годы), в августе  $0,16 \pm 0,04$  (маловодные), без достоверного отличия.

Фитопланктон средней части Красноярского водохранилища представлен 273 внутривидовыми и видовыми таксонами из 7 отделов, 10 классов, 21 порядка, 45 семейств и 107 родов. Наиболее богаты видами и внутривидовыми таксонами зеленые (98) и диатомовые (75 таксонов) водоросли.

Видовой состав альгофлоры в различные по водности годы претерпевает изменения, сохраняя форму распределения с увеличением в сторону зеленых водорослей и доминированием по количеству таксонов. Их доля в общем видовом составе колебалась от 30 % (маловодные годы) до 40 % (многоводные).

В многоводные годы в июне доминирующими таксонами выступали *Acanthoceras zachariasii* (Brun) Sim., *Fragilaria crotonensis* Kitt. и *Dinobryon divergens* Imhof.; в июле – таксоны рода *Cyclotella* и *F. crotonensis*; в августе - *F. crotonensis*. Средневодные и маловодные годы имели похожий комплект доминантов: в июне превалировали *F. crotonensis*, *Asterionella formosa* Hass.; в июле и августе – таксоны рода *Cyclotella* и *F. crotonensis*.

Величины БПК используются в качестве санитарного показателя и характеризуют содержание нестойкого легко окисляющегося вещества в природных водах. Под биохимическим потреблением кислорода понимается количество кислорода, которое расходуется на окисление легкодоступной части этих веществ, находящихся в воде.

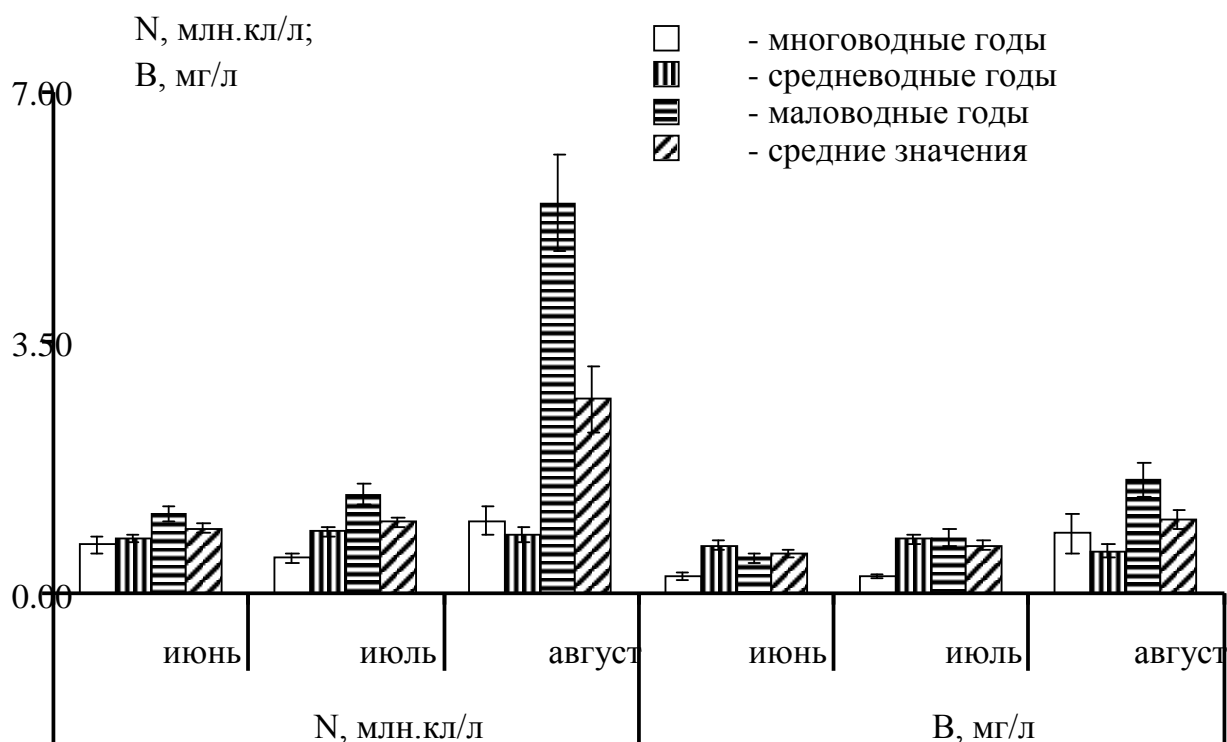


Рис. 2. Динамика численности (N, млн.кл/л) и биомассы (B, мг/л) в различные по водности годы.

Степень разложения легкоокисляемой части РОВ в 5-и суточной экспозиции достигает 70-80%. Исследование процессов трансформации растворенного органического вещества (РОВ), механизмов процессов самоочищения и круговорота соединений биогенных элементов в природных водах представляет значительный научно-практический интерес в связи с возрастающим загрязнением водоемов.

На рис. 3 представлена динамика изменения значений БПК для центральной части Красноярского водохранилища. На графике хорошо видно, что значения БПК<sub>5</sub> возрастает с годами, хотя сам характер кривой БПК не изменяется. Это свидетельствует об увеличении количества растворенного органического вещества в водохранилище без изменения состава.

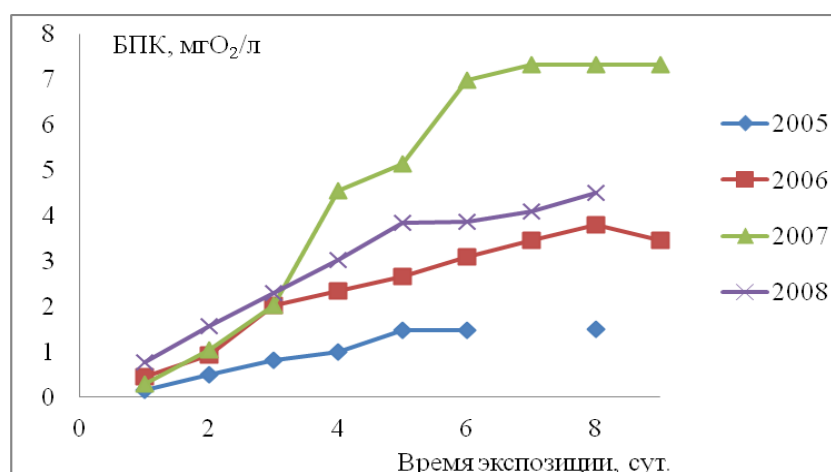


Рис. 3. Межгодовая динамика изменения значений биохимического потребления кислорода (БПК) для центральной части Красноярского водохранилища.

Итоговая оценка качества воды по численности бактериопланктона, биомассы фитопланктона и индекса сапробности соответствуют 3 классу качества,  $\beta$ -мезосапробной зоне; показатель трофности относится к градации ниже средней мезотрофного класса.

Первичная ( $0,24 \pm 0,04$  в июне и  $0,36 \pm 0,05$  мгО<sub>2</sub>/л в августе в многоводные годы) и удельная продукция ( $15,1 \pm 1,8$  и  $11,9 \pm 4,1$  в июне и  $5,09 \pm 1,21$  и  $0,59 \pm 0,16$  сут<sup>-1</sup> в августе в многоводные и маловодные годы соответственно) фитопланктона для всех лет и месяцев не имели достоверных различий при увеличении первичной продукции от июня к августу и уменьшению удельной первичной продукции. Определена достоверная разница удельной первичной продукции в средневодные годы между июнем и июлем ( $14 \pm 4$  и  $1,60 \pm 0,22$  сут<sup>-1</sup> соответственно) (рис. 4).

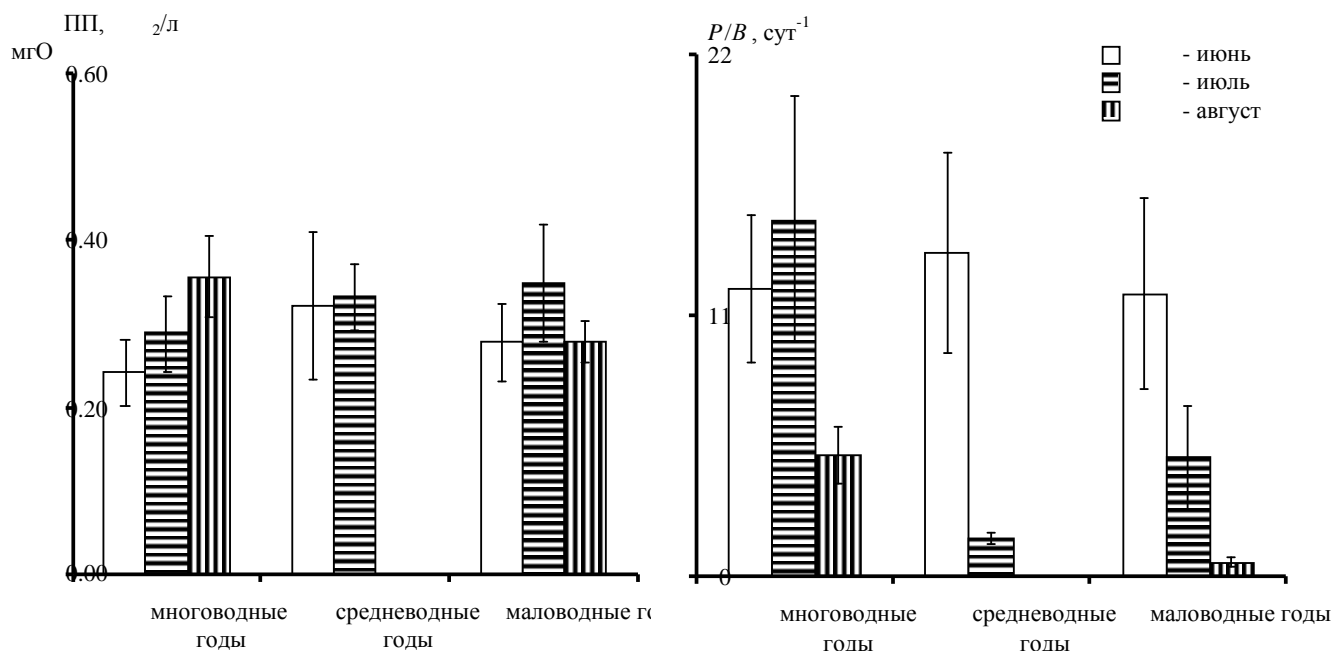


Рис. 4. Динамика первичной и удельной продукции фитопланктона в вегетационный период в различные по водности годы.

Как отмечено в работах [7-8], ослабление эффекта антропогенного евтрофирования, проявившееся в значительном снижении развития синезеленого планктона и увеличении доли диатомового (55-94 % от общей биомассы) проявилось после 2000 г. и является показателем снижения трофности Красноярского водохранилища. Проведенные исследования указывают на изменчивый характер показателей активности фитопланктонного звена Красноярского водохранилища, что может свидетельствовать о периодах цветения водоема. Это подтверждается и гидробиологическими данными. На состояние самого водохранилища влияют как уровни наполнения водохранилища, так и удаленность от плотины.

#### Литература:

1. Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем/ А. Ф. Алимов // СПб.: Наука, -2001. – 147 с.
2. Лопатин В. Н., Апонасенко А. Д., Щур Л. А. Биофизические основы оценки состояния водных экосистем (теория, аппаратура, методы, исследования)/ В.Н.Лопатин, А.Д.Апонасенко, Л.А. Щур – Новосибирск: Изд-во СО РАН, -2000.–360 с.
3. Поглазова М. Н., Мицкевич И. Н. Применение флуорескамина для определения количества микроорганизмов в морской воде эпифлуоресцентным методом/ М.Н.Поглазова, И.Н. Мицкевич // Микробиология. - 1984. - Т. 53, - Вып.5. - С. 850-858.
4. Красноярское водохранилище: мониторинг, биота, качество воды //отв. за выпуск З.Г. Гольд. – Красноярск: Изд. Сибирского федерального ун-та, - 2008. – 538 с.
5. Алекин О. А. Основы гидрохимии/ О. А. Алекин // Л. Гидрометеиздат, 1- 970. –т 444 с.

6. Shchur L. A. Modern Phytoplankton of the Krasnoyarsk Reservoir and the Quality of Its Water //Hydrobiological Journal. – 2012. - V.48. – N 1. – P.3-12.

7. Гольд З. Г., Глущенко Л. А., Морозова И. И. и др. Межгодовая динамика биологических показателей в оценке качества воды и структуры экосистемы глубоководного водоема (на примере Красноярского водохранилища)/ З. Г. Гольд, Л. А. Глущенко, И. И. Морозова и др // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы II Междунар. науч. конф., Минск – Нарочь, 22–26 сент. 2003 г. – Минск: Изд. Белорус. ун-та, - 2003. – С. 115–117.

8. Иванова Е. А. Динамика и функциональная роль фитопланктона в экосистемах водохранилищ бассейна Верхнего Енисея/ Е. А. Иванова// Автореф. дис. ... докт. биол. наук. – Красноярск, -2004. – 32 с.

## LONG-TERM HYDROBIOLOGICAL RESEARCH OF THE CENTRAL PART OF THE KRASNOYARSK RESERVOIR

Polina Vladimirovna Postnikova

Ph. D, scientific researcher

Department of Computational Models in Hydrophysics

Institute of computational modelling SB RAS,

E-mail: polina@icm.krasn.ru

Galina Vladimirovna Makarskaya,

Ph. D, scientific researcher

Department of Computational Models in Hydrophysics

Institute of computational modelling SB RAS

E-mail: mgv@icm.krasn.ru

Anatoly Dmitrievich Aponasenko,

Ph. D, scientific researcher

Department of Computational Models in Hydrophysics

Institute of computational modelling SB RAS

E-mail: apon@icm.krasn.ru

Yuliya Andreevna Ponomareva,

Ph. D, scientific researcher

Department of Computational Models in Hydrophysics

Institute of computational modelling SB RAS

E-mail: ponomarevayulia@mail.ru

*Abstract:* Modern studies are presented for the period 2000-2015 years. The aim of the research was to investigate interannual variability of hydrobiology parameters as an indicator of stability of functioning of the Krasnoyarsk reservoir. In the work are presented of the distribution of the concentration of chlorophyll "a", the photosynthetic activity of phytoplankton, the abundance and biomass of phyto- and bacterioplankton, primary production and bacterial production, the dynamics of biochemical oxygen demand and standard assessments of the water quality in the Krasnoyarsk reservoir

*Keywords:* dissolved organic matter, biochemical oxygen demand, primary production, bacterial production, photosynthetic activity of phytoplankton, chlorophyll "a"

## ОЗЕРНО-РЕЧНАЯ СИСТЕМА БАЙКАЛ-СЕЛЕНГА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Татьяна Гавриловна Потемкина,  
к.г.н., старший научный сотрудник  
ФГБУН «Лимнологический институт СО РАН»  
E-mail: [tat\\_pot@lin.irk.ru](mailto:tat_pot@lin.irk.ru)

*Аннотация:* Рассмотрены основные факторы глобального потепления климата и антропогенной деятельности, влияющие на гидролого-морфологические процессы озерно-речной системы оз. Байкал – р. Селенга. Проведен анализ изменений температуры воздуха, количества атмосферных осадков, стока воды и наносов рек за период наблюдений. Определены тенденции этих характеристик и взаимосвязи между ними. Рассмотрены вопросы деградации многолетней мерзлоты, изменения уровня подземных вод, притока воды в Байкал и многолетние колебания уровня озера. Полученные результаты показали, что влияние глобального потепления в водосборном бассейне Байкала более значительное, чем в других регионах, так как темпы роста температуры воздуха здесь почти в 2 раза выше темпов роста глобальной температуры. Многолетнее изменение атмосферных осадков характеризуется преимущественно слабо выраженными трендами. Потепление способствовало увеличению испарения на территории озерно-речной системы Байкала и усилению аридизации климата, уменьшению стока воды (на 12% – 40%) и стока наносов (на 50%) р. Селенги и ее притоков, уменьшению притока речных вод в озеро (68 % от среднего значения в 2014 г.), снижению уровня воды озера, понижению уровня подземных вод (на 0,55 – 6,0 м), деградации вечной мерзлоты. На фоне глобального потепления увеличение антропогенного воздействия на озерно-речную систему оз. Байкал – р. Селенга может привести к нарушению или изменению ее режима (особенно в периоды экстремальных природных процессов), а также к серьезным экологическим рискам и ущербам для Байкальского региона.

*Ключевые слова:* оз. Байкал, глобальное потепление, антропогенные факторы, речной сток, уровень воды озера

Современные изменения климатических условий, усиление антропогенного воздействия и последствия их влияния на озерно-речные системы стали глобальной темой, которая приобретает особую остроту и для Байкальского региона.

Байкал сегодня – участок Всемирного наследия с размещением 20% мировых запасов пресной воды высокого качества. После строительства на р. Ангаре каскада ГЭС Байкал превратился из естественного водоема в регулируемое водохранилище. Несмотря на это природные процессы вносят изменения в режим озерно-речной системы. Так, в осенне-зимний период 2014 – 2015 гг. в условиях длительного маловодья в бассейне Байкала, уровень воды озера опустился на 14 см ниже минимального значения диапазона его колебаний (456,0 – 457,0 м ТО), установленного Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 марта 2001 года. Кроме этого, в ближайшей перспективе серьезные опасения для российской территории бассейна оз. Байкал вызывает реализация проектов в Монголии, включающих строительство ряда ГЭС на р. Селенге и ее притоках. При наличии Монгольского каскада ГЭС сложившаяся ситуация 2014-2015 гг. с уровнем оз. Байкал могла бы привести к более серьезным негативным изменениям в режиме системы Селенга-Байкал. Ввод в эксплуатацию Монгольских ГЭС будет связан как с экологическими, так и с экономическими и социально-культурными проблемами на российской территории бассейна Байкала. Произойдет перераспределение годового стока воды Селенги, что нанесет вред ее биоресурсам и, следовательно, Байкала. Еще больше уменьшится сток наносов реки, поскольку плотины ГЭС являются ловушками для речных наносов, что изменит русловые процессы и местообитания (например, нерестилища) ниже по течению. Усилятся процессы эрозии,



увеличатся риски оползней, начнутся перестройка режима устьевой области Селенги и ее дельты, изменения водно-болотных угодий и др. Ухудшатся качество воды и условия водоснабжения.

В связи с указанными причинами значительно вырос научный интерес к изучению изменений в режиме стока р. Селенги, ее притоков и режиме оз. Байкал. В первую очередь изменение режима р. Селенги, сток которой составляет около половины притока речных вод в оз. Байкал, влияет на режим озера. Результаты проведенного анализа изменений основных факторов глобального потепления климата, влияющих на гидролого-морфологические процессы озерно-речной системы оз. Байкал – р. Селенга будут полезны для научных, экологических и практических целей, а также для рационального природопользования и охраны водных ресурсов.

В среднем за год Селенга приносит в Байкал около 28 км<sup>3</sup> воды (1934 – 2013 гг.). 46 % годового стока реки формируется на территории Монголии. Средний расход воды вблизи границы Монголии и России 310 м<sup>3</sup>/сек [1]. Среднегодовой (за период наблюдений по 2013г. включительно) расход воды р. Селенга – рзд. Мостовой (замыкающий створ) составляет 887 м<sup>3</sup>/с, расход взвешенных наносов – 54 кг/с, мутность воды – 60 г/м<sup>3</sup>. Многолетние изменения гидрометеорологических характеристик показаны на рисунке.

Влияние глобального потепления в водосборном бассейне Байкала более значительное, чем в других регионах, так как темпы роста температуры воздуха здесь почти в 2 раза выше темпов роста глобальной температуры. При среднем глобальном потеплении 0,75°C потепление в Прибайкалье и Забайкалье составило 1,65°C за 100 лет [2]. В водосборном бассейне Байкала потепление в зимние месяцы было наибольшим [1,3].

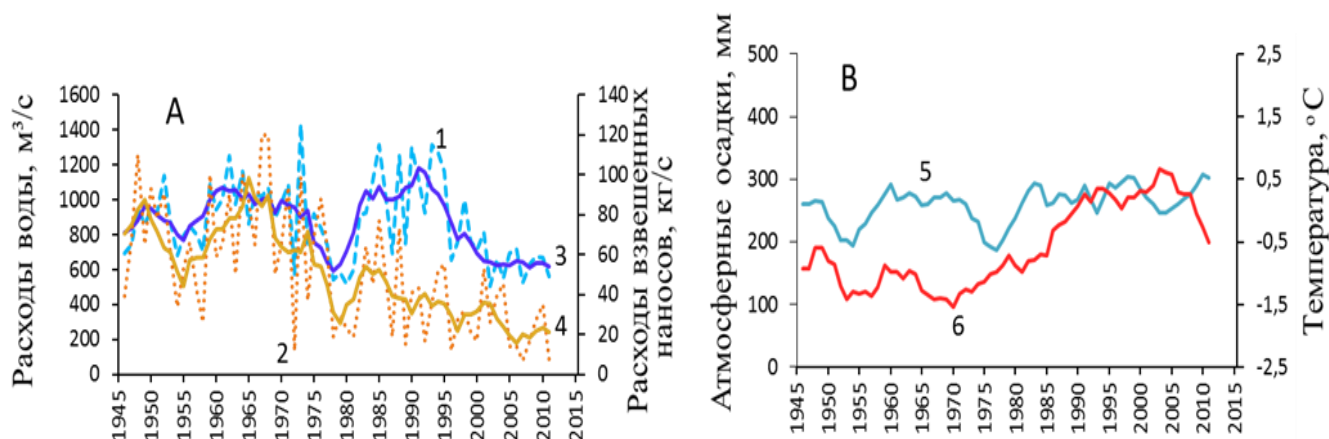


Рис. 1. Многолетние изменения расходов воды и взвешенных наносов р. Селенги – рзд. Мостовой (А), атмосферных осадков и температуры воздуха (В). Среднегодовые расходы воды (1) и взвешенных наносов (2) при скользящем осреднении по пятилеткам (3 и 4). Осредненные по пятилеткам годовые атмосферные осадки (5) и среднегодовая температура воздуха (6).

Атмосферные осадки на территории озерно-речной системы распределены неравномерно и, в целом, многолетние их изменения характеризуются преимущественно слабо выраженными трендами [1,4,5]. При этом на рассматриваемой территории и, особенно, в Монголии высока испаряемость с поверхности суши, превышающая количество выпадающих осадков, и которая в настоящее время имеет тенденцию к постепенному увеличению во всех природных зонах МНР. Это способствует аридизации климата и опустыниванию в бассейне р. Селенги. Ярким проявлением аридизации климата является увеличение повторяемости и продолжительности засух на всей территории Монголии, наиболее сильные из которых наблюдались в 2000 – 2008 гг. (пересохли водные объекты, исчезли пастбища, погиб скот) [5,6].

Потепление, усилившееся во второй половине 1970-х гг., способствовало уменьшению стока воды (на 12% – 40%) и стока наносов (на 50%) р. Селенги и ее притоков [1, 4], уменьшению притока речных вод в озеро (68 % от среднего значения в 2014 г.), снижению уровня воды в

Байкале ниже минимального значения диапазона его колебаний (456,0 – 457,0 м ТО), понижению уровня подземных вод (на 0,55 – 6,0 м) [1], деградации вечной мерзлоты.

Маловодье, начавшееся в Байкальском регионе с 1996 г. и продолжающееся по настоящее время, по предварительной оценке, может продлиться до четверти века. Если предположить, что эти условия и процессы будут действовать на протяжении длительного времени, то может быть нарушен естественный (в условиях зарегулирования) режим колебания уровня Байкала и начаться его устойчивое снижение. А ввод в эксплуатацию Монгольского каскада ГЭС на Селенге и ее притоках, способствующее прежде всего, сокращению стока реки из-за безвозвратных его потерь на заполнение водохранилищ, испарение с поверхности искусственных водоемов, развитие крупномасштабного поливного сельского хозяйства МНР, будет серьезным негативным воздействием на озерно-речную систему Байкала.

Современное состояние озерно-речной системы Байкал-Селенга пока еще контролируется преимущественно природными процессами. Однако, усиление антропогенного воздействия (особенно в периоды экстремальных природных процессов) может привести к нарушению или изменению ее режима.

#### Литература:

1. Ресурсы подземных вод в неглубоких трансграничных водоносных горизонтах в бассейне озера Байкал: современный уровень знаний, охрана и управление // Отчет для Трансграничного диагностического анализа бассейна озера Байкал. – Россия-Монголия, UNESCO-ИНР. – 2013. – 77 с.

2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М., Росгидромет. – 2008. – 28 с.

3. Nandintsetseg B., Goulden C. E., Greene J. S. Recent climate change study near Lake Hovsgol, in Changes in Climate, Ecology and Patterns of Pastoral Nomadism in Lake Hovsgol National Park, Mongolia // Admon Publ., Ulanbaatar, Mongolia. – 2006. – PP. 25–26.

4. Potemkina T. G., Potemkin V. L. Sediment load of the main rivers of Lake Baikal in a changing environment (East Siberia, Russia) // Quaternary International. – 2015. – Vol. 380-381. – PP. 342-349.

5. Гунин П. Д., Казанцева Т. И., Бажа С. Н., Данжалова Е. В., Дробышев Ю. И. Экологические последствия влияния аридизации климата на экосистемы Центральной Монголии // Изменение климата Центральной Азии: социально-экономические и экологические последствия. – Чита, Изд-во Заб. ГГПУ. – 2008. – С. 71-84.

6. Batima P., Natsagdorj L., Gombludev P., Erdenetsetseg B. Observed climate change in Mongolia // AIACC Working Paper. – 2005. – No 12. – PP. 4–26.

**LAKE-RIVER SYSTEM OF LAKE BAIKAL – SELENGA RIVER  
UNDER THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE  
AND ANTHROPOGENIC IMPACT**

Tatiana Gavrilovna Potemkina,  
Ph. D. in Geography, senior research scientist  
Limnological Institute SB RAS  
E-mail: [tat\\_pot@lin.irk.ru](mailto:tat_pot@lin.irk.ru)

*Abstract:* The major global warming and anthropogenic activity factors that influence on hydrological-morphological processes of lake-river system Lake Baikal – Selenga River are reviewed. The changes of air temperature, amount of precipitation, rivers water and sediment runoff are analyzed. Trends of these characteristics and their interconnections are determined. The problems of permafrost degradation, changes in the level of groundwater, inflow into the lake and long-term fluctuations of the lake's level are considered. The results showed that the global warming impact in the water catchment area of Lake Baikal is greater than in other regions because the increase rate of the air temperature in Baikal area is almost two times higher than the increase rate of global temperature. Long-term changes of precipitation are characterized mainly by mild trends. The warming caused a number of changes: increase of evaporation on the territory of lake-river system of Lake Baikal and strengthening of the aridization of climate, decrease of water runoff (by 12% – 40%) and sediment runoff (by 50%) of Selenga and its' tributaries, decrease of river water inflow into the lake (68% of average number in 2014), lowering of the lakes' water level, lowering of groundwater level (by 0,55 – 6,0 m), permafrost degradation. With the background of global warming the increase of anthropogenic impact on lake-river system Lake Baikal – Selenga river can violate or change its' regime (especially during periods of extreme natural processes), and can cause high ecological risks and damages to Baikal region.

*Keywords:* Lake Baikal, global warming, anthropogenic factors, the river flow, the water level of the lake

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Елена Викторовна Протопопова,  
научный сотрудник Лаборатории гидробиологии  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт озераедения Российской академии наук  
E-mail: [Ephyto@mail.ru](mailto:Ephyto@mail.ru)

*Аннотация:* Исследован литоральный фитопланктон Ладожского озера летом в 2014 г. Выявлены различия в доминирующих комплексах в разных районах литоральной зоны озера. Проведено сравнение с предыдущими исследованиями. Дана оценка качества воды в литоральной зоне озера.

*Ключевые слова:* фитопланктон, Ладожское озеро, биомасса, индекс сапробности

Литоральная зона является важной пограничной системой между наземным и водным природными комплексами, это место активного смешения вод различного происхождения (речной и склоновый стоки, собственно озерные воды) и интенсивного протекания продукционно-деструкционных процессов.

Площадь литоральной зоны Ладожского озера достигает  $2638,6 \text{ km}^3$  (14,8 % от площади всего озера), объем водной массы составляет  $10,556 \text{ km}^3$  (1,3 % от объема озера) [2]. Учитывая физические, морфометрические и геоботанические особенности, литоральная зона Ладожского озера разделена на три основных района: южный, район открытых берегов (с подразделением на западный и восточный) и шхерный район [7].

Исследования фитопланктона в различных участках литоральной зоны проводились с середины 80-х годов 20 века [1,4,5,6,8,10,11].

Исследование литорального фитопланктона по периметру Ладожского озера проводилось с 20 по 30 июля 2014 г. Пробы объемом 0,5 л отбирались батометром Рутнера в мелководных биотопах (глубина на станциях изменялась от 0,2 до 1 м) в основном в различных ассоциациях макрофитов и фиксировались раствором Люголя. Всего было исследовано 29 биотопов в районах южного, восточного, западного берегов и в районе шхер. Всего в 29 количественных пробах было обнаружено 163 представителя фитопланктона рангом ниже рода, относящихся к 9 отделам водорослей: Chlorophyta (57), Bacillariophyta (35), Cyanophyta (32), Chrysophyta (12), Cryptophyta (9), Euglenophyta (6), Dinophyta (8), Xanthophyta (3) и Raphidophyta (1). Это на 16 видов больше чем в 2006 г. Наибольшим разнообразием, как и в прежние годы, отличались зеленые, диатомовые и синезеленые водоросли (соответственно 35, 21 и 20% от общего числа таксонов), остальные группы водорослей составляли менее 10% от общего числа таксонов. Максимальное количество видов (61) наблюдалось в Волховской губе (южный район), а минимальное (12) – в Якимварском заливе (шхерный район, табл.1).

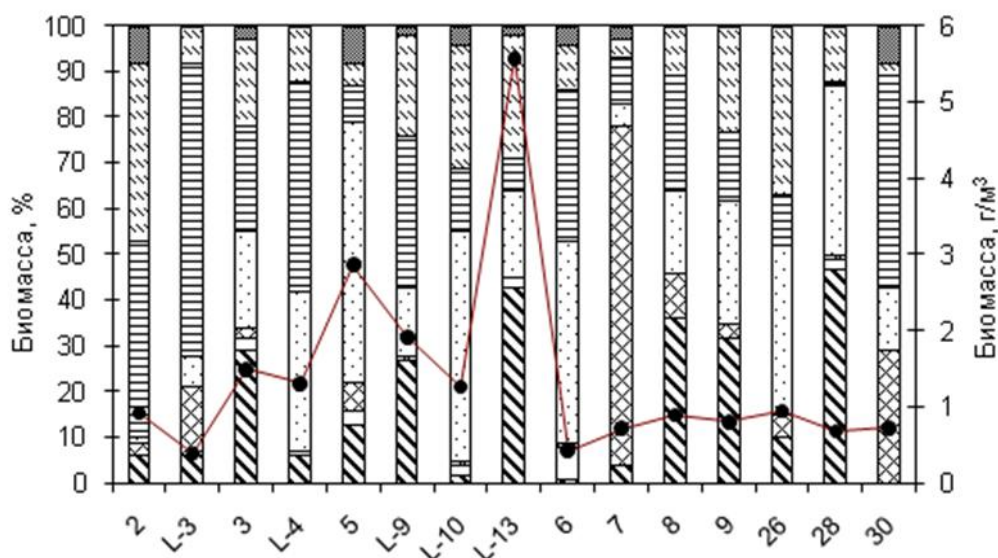
Из всех встреченных видов 93% были типичными планктонными формами. Подавляющее большинство водорослей – пресноводные олигогалобы, из которых 80% - индиференты, 14% - галлофилы и 6% - галлофобы. По географическому распространению 82% являются космополитами, 12% - бореальными и 6% - северо-альпийскими. В составе фитопланктона найдено 116 видов индикаторов сапробности. Из них 83 вида или 72% относятся к олигобета- и бетамезосапробным формам, бета-альфамезосапробы и альфамезосапробы – по 5%, олигосапробы – 15% и ксеносапробы – 3%.

Таблица 1

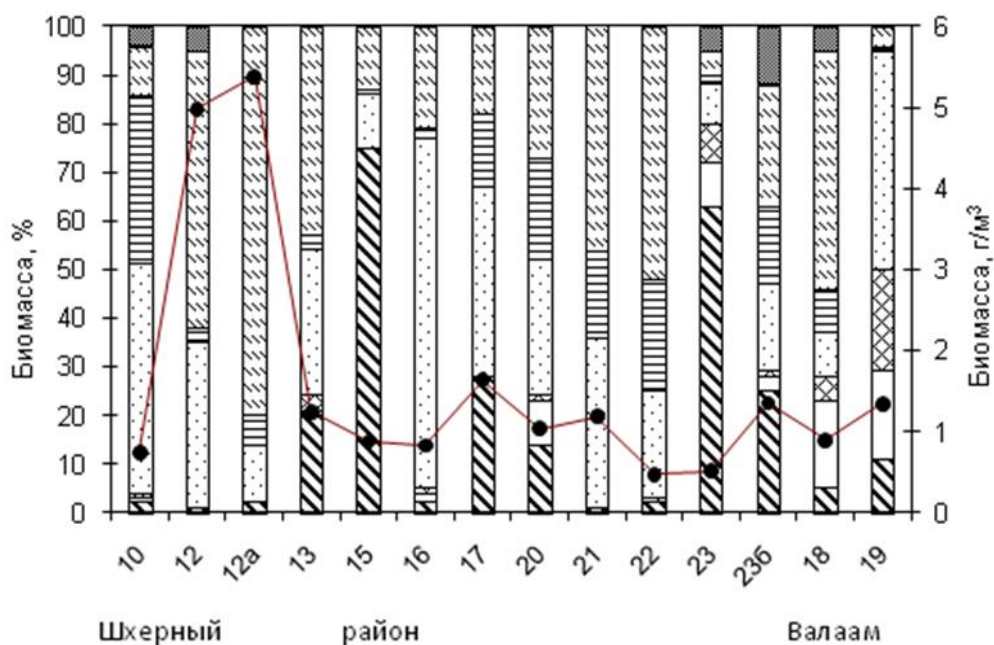
Структурно-функциональные характеристики литорального фитопланктона в 2014 г.

	Станции	Количество видов	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	Численность, тыс.кл./л	Индекс сапробности
Южный район	2	36	0,92	27800	1,72
	L-3	29	0,38	1914	2,04
	3	37	1,49	13652	1,69
	L-4	35	1,30	8610	1,66
	5	44	2,86	6390	1,91
	6	22	0,42	852	1,88
	L-9	52	1,91	10316	1,67
	L-10	38	1,27	6514	2,12
	L-13	61	5,57	25257	1,74
Западный район	26	19	0,95	1526	1,99
	28	20	1,88	1440	1,88
	30	18	0,73	4098	1,74
Восточный район	7	25	0,72	5304	1,66
	8	26	0,89	4304	1,91
	9	25	0,80	2380	1,73
Шхерный район	10	23	0,75	3744	2,28
	12	27	4,98	34705	1,81
	12a	30	5,38	45424	1,82
	13	18	1,24	10304	1,76
	15	25	0,88	3020	1,68
	16	14	0,83	4696	1,76
	17	23	1,64	5096	1,78
	20	21	1,03	3904	1,76
	21	12	1,19	7064	1,70
	22	15	0,47	2634	1,82
	23	28	0,51	1024	1,70
	23б	31	1,35	9652	1,97
Валаамский архипелаг	18	30	0,89	5948	1,68
	19	17	1,34	4176	1,68

Вклад основных систематических групп водорослей в общую биомассу фитопланктона исследуемых станций представлен на рис. 1.



Б. Петрокреп. Волховская губа Св. г. Восточн. б.



Шхерный

район

Валаам



Рис. 1. Структура фитопланктона по биомассе на литоральных станциях Ладожского озера, 20-30 июля 2014 г.

В районе бухты Петрокрепость (это станции 2, L-3, 3) преобладали преимущественно зеленые (23-64% от общей биомассы фитопланктона) и синезеленые (11-39%), а на отдельных станциях также диатомовые (29%) и криптофитовые (21%) водоросли. Доминировали такие виды как *Botryococcus braunii*, *Mougeotia sp.*, *Microcystis elachista*, *Anabaena spiroides*, *Tabellaria fenestrata* и *Cryptomonas sp.* В отличие от предыдущих лет исследований (2000 и 2006 гг) золотистые водоросли, характерные для бухты Петрокрепость, входили в число доминант с видом *Uroglena americana* только на одной из трех станций.

В районе Волховской губы (станции L-4, 5, L-9, L-10, L-13) преобладали преимущественно криптофитовые (15-57% от общей биомассы фитопланктона) и синезеленые (12-27%), а на



отдельных станциях также зеленые (до 46%) и диатомовые (до 43%) водоросли. Доминировали виды рода *Cryptomonas* (*Cr. erosa*, *Cr.sp.*), *Rhodomonas lacustris*, *Microcystis grevillei*, виды рода *Anabaena* (*A. circinalis*, *A. spiroides*), из зеленых водорослей – *Coelastrum sphaericum*, из диатомей – *Aulacoseira islandica* и *Fragilaria virescens*.

В районе Свирской губы (станция 6) преобладали криптофитовые (44%) и зеленые (33%) водоросли. Доминировали виды рода *Cryptomonas* и *B. braunii*.

В районе Восточного берега (станции 7, 8, 9) преобладали золотистые (до 74% от общей биомассы фитопланктона), диатомовые (до 36%), зеленые (11-25%), криптофитовые (до 27%) и синезеленые (до 23%) водоросли. Доминировали виды *Dinobryon divergens*, *A. islandica*, *A. subarctica*, *T. fenestrata*, *B. braunii*, *Cr. sp.*, и *Aphanizomenon flos-aquae*.

В районе Западного берега (станции 26, 28, 30) преобладали криптофитовые (14-37% от общей биомассы фитопланктона) и синезеленые (12-37%), а на отдельных станциях также диатомовые (47%), зеленые (46%) и золотистые (29%) водоросли. Доминировали виды рода *Cryptomonas* (*Cr. erosa*, *Cr.sp.*), *Anabaena lemmemaii*, *A. islandica*, *Fragilaria crotonensis*, *B. braunii* и *Ur. americana*.

Шхерный район озера оказался наиболее разнообразным по доминирующим видам. Так в районе г. Питкяранта (ст. 10), в доминантный комплекс фитопланктона входили криптомонады (вид *R. lacustris*) и зеленые водоросли (вид *B. braunii*) В заливе Импилахти (ст. 12 и 12а) в массе развивались синезеленые (57-80%) водоросли, с доминантами *Aph. flos-aquae*, *A. circinalis* и *A. spiroides*. В заливе Хауккалаhti (ст. 13) преобладали синезеленые, криптофитовые и диатомовые водоросли с видами *Aph. flos-aquae*, *Woronichinia naegeliana*, *R. lacustris* и *F. crotonensis*. Около поселка Ляскеля (ст. 15) диатомеи составляли 75% от общей биомассы фитопланктона. Доминировали *F. crotonensis* и *Achnanthes lanceolata*. В районе мыса Умоппиуми (ст. 16) преобладали преимущественно криптомонады (72%), виды *Cr. erosa*, *Cr.sp.* и *R. lacustris*. В заливе у полуострова Рауталаhti (ст. 17) и в районе острова Путсари (ст. 20) в доминантный комплекс фитопланктона входили представители диатомовых (*T. fenestrata*, *F. crotonensis*), криптофитовых (*Cr. erosa*, *Cr.sp.* и *R. lacustris*), синезеленых (*A. lemmemaii*) и зеленых (*B. braunii*) водорослей. В Яккимварском заливе (ст. 21) и у острова Хаукасари (ст. 22) наиболее многочисленными были синезеленые (*Aph. flos-aquae*), криптофитовые (*Cr. erosa*, *Cr.sp.* и *R. lacustris*) и зеленые (*B. braunii*) водоросли. В районе устья р. Вуоксы (ст. 23) диатомеи составляли 63% от общей биомассы фитопланктона. Доминировали виды *Aulacoseira italica* и *A. subarctica*. А на ст. 23 б, в районе г. Приозерск в доминантный комплекс фитопланктона входили диатомовые, синезеленые, криптофитовые, зеленые и рафидофитовые водоросли. Преобладали виды *A. italica*, *Plankthothrix agardhii*, *R. lacustris*, *B. braunii* и *Gonyostomum semen*.

В районе о. Валаам было исследовано, как и в прошлые годы, две станции. На озере Сисьярви (ст. 18) преобладали синезеленые (49% от общей биомассы) и динофитовые (18%) водоросли, с доминантами *A. crassa*, *A. spiroides* и *Peridinium cinctum*. В районе Никольской бухты (ст. 19) в доминантный комплекс фитопланктона входили криптофитовые (45%), золотистые (21%) и динофитовые (18%) водоросли. Доминировали виды *Cr. erosa*, *Cr.sp.*, *Ur. americana* и *P. umbonatum*.

На всех исследованных станциях литоральной зоны общая численность водорослей изменялась от 852 до 45424 тыс.кл/л, а биомасса от 0,38 до 5,57 г/м<sup>3</sup>. Минимальная численность водорослей наблюдалась в районе Свирской губы, а минимальная биомасса – в районе Назия (бухта Петрокрепость). Максимальная численность водорослей была выявлена в заливе Импилахти, а максимальная биомасса – в районе устья реки Сясь. Индекс сапробности колебался от 1,66 (Андрусовская бухта) до 2,28 (возле г. Питкяранта) (табл. 1).

В таблице 2 приведены предельные и средние величины биомассы литорального фитопланктона в различных районах Ладожского озера для лета 2000, 2006 и 2014 годов. Из таблицы видно, что среднее значение биомассы для бухты Петрокрепость фактически не меняется, для Волховской губы эта величина в 2014 г возросла примерно в два раза, по сравнению с предыдущими исследованиями, а для районов открытых берегов, наоборот, оказалась в два раза меньше. Также наблюдается тенденция уменьшения биомассы фитопланктона в районе северных

шхер и Валаамского архипелага. Все это может быть связано, как с различным количеством исследованных станций в каждом определенном районе озера, так и с различными доминантами в 2000, 2006 и в 2014 г. В предыдущие годы в районах открытых берегов наблюдалось больше диатомовых водорослей, которые соответственно давали большую биомассу.

По сапробиологическому анализу альгоценозов почти все исследованные станции литорали в 2014 г, как и в предыдущие исследования, входили в бета-мезосапробную зону. По шкале трофности [9] район открытых берегов можно охарактеризовать как слабomezотрофный, а все остальные районы Ладожского озера, как и в конце 90-х – первое десятилетие 2000-х, как мезотрофные. Таким образом, по трофо-сапробиологическим показателям [3] литоральную зону Ладожского озера можно отнести к III классу воды (вода удовлетворительной чистоты).

Таблица 2

Предельные и средние величины биомассы ( $г/м^3$ ) литорального фитопланктона в различных районах Ладожского озера летом 2000, 2006 и 2014 гг.

Районы озера	n	2000 г.	n	2006 г.	n	2014
<i>Район I (южный берег)</i>						
Бухта Петрокрепость	2	<u><b>0,77</b></u>	2	<u><b>0,58</b></u>	3	<u><b>0,93</b></u>
Волховская губа		0,59 – 0,95		0,23 – 0,86		0,38 – 1,49
	2	<u><b>0,89</b></u>	2	<u><b>1,22</b></u>	5	<u><b>2,58</b></u>
Свирская губа		0,71 – 1,07		1,02 – 1,43		1,27 – 5,57
<i>Район II (открытые берега)</i>						
Западный берег	1	<u><b>0,52</b></u>	1	<u><b>5,45</b></u>	1	<u><b>0,42</b></u>
Восточный берег	7	<u><b>1,75</b></u>	5	<u><b>1,92</b></u>	3	<u><b>0,78</b></u>
		0,62 – 5,59		0,38 – 6,65		0,68 – 0,95
<i>Район III (шхеры)</i>						
Северные шхеры	3	<u><b>1,25</b></u>	3	<u><b>2,04</b></u>	3	<u><b>0,80</b></u>
		0,25 – 2,38		0,21 – 4,13		0,72 – 0,89
Валаамский архипелаг	10	<u><b>3,89</b></u>	9	<u><b>2,0</b></u>	12	<u><b>1,69</b></u>
		0,53 – 19,31		0,69 – 5,58		0,47 – 5,38
	2	<u><b>1,5</b></u>	2	<u><b>1,96</b></u>	2	<u><b>1,11</b></u>
		1,16 – 1,83		1,5 – 2,43		0,89 – 1,34

#### Литература:

1. Летанская Г. И., Распопов И. М., Рычкова М. А. // Продуктивность автотрофных сообществ мелководных заливов. Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Ленинград. 1987. С. 111-116.
2. Науменко М. А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера // Докл. РАН. 1995. Т. 345. №4. С. 514-517.
3. Оксийук О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29. № 4. С. 62-76.
4. Протопопова Е. В. Фитопланктон различных районов литоральной зоны // Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука. 2002. С. 250-253.
5. Протопопова Е. В. Литоральный фитопланктон Ладожского озера (лето 2000 г) // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер. Труды



IV Международного симпозиума по Ладожскому озеру. Великий Новгород, 2-6 сентября 2002 г. СПб. 2003. С. 214-218.

6. Протопопова Е. В. Фитопланктон литоральной зоны Ладожского озера //Литоральная зона Ладожского озера. СПб. 2011. С.102-127.

7. Распопов И. М. Высшая водная растительность Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л. 1968. С. 16-72.

8. Распопов И. М., Андроникова И. Н., Слепухина Т. Д., Расплетина Г. Ф., Рычкова М. А., Барбашова М. А., Доценко О. Н., Протопопова Е. В. Прибрежно-водные экотоны больших озер. СПб. 1998. 54 с.

9. Трифонова И. С. Изменение фитопланктонных сообществ при эвтрофировании озер. Автореф. Дисс. ... докт. Биол. Наук. СПб. 1994. 78 с.

10. Letanskaya G. & Hindak F. Phytoplankton of two bays of the Lake Ladoga skerry part. // Biologia. Bratislava 47. 1992. С. 287-294

11. Raspopov I. M., Andronikova I. N., Dotsenko O. N., Kurashov E. A., Letanskaya G. I., Panov V. E., Rychkova M. A., Telesh I. V., Tchernykh O. A., Vorontsov F. F. Littoral zone of Lake Ladoga: ecological state evaluation // Hydrobiologia. 1996. V. 322. P. 39-47.

## **THE CURRENT STATE OF THE PHYTOPLANKTON IN LITTORAL ZONE OF LAKE LADOGA**

Elena Viktorovna Protopopova  
Researcher scientist laboratory of hydrobiology  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [Ephyto@mail.ru](mailto:Ephyto@mail.ru)

*Abstract:* Littoral phytoplankton was investigated in Lake Ladoga in summer 2014. In different areas of littoral zone of the lake were found differences in the dominant complexes. It was compared with previous studies. It was given an assessment of the water quality in littoral zone of the lake.

*Keywords:* phytoplankton, Lake Ladoga, biomass, saprobic index

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ПЕРИФИТОНА В МОНИТОРИНГЕ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Александр Геннадьевич Русанов,  
к.б.н., старший научный сотрудник  
Лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН  
E-mail: a\_rusanov@yahoo.com

*Аннотация:* Оценка возможности использования функциональных групп диатомовых водорослей перифитона в мониторинге эвтрофирования литоральной зоны Ладожского озера проведена при помощи оценивания компонент дисперсии на основе частного анализа избыточности. Результаты анализа показали, что относительная роль факторов среды и процессов расселения в пространственной изменчивости видовой структуры каждой из четырех функциональных групп (низкорослых, высокорослых, подвижных и планктонных) диатомовых водорослей различается. Факторы среды играли наиболее значительную роль в группах низкорослых и высокорослых диатомей. Содержание общего фосфора оказывало наибольшее влияние на изменчивость низкорослых диатомей, что указывает на важную роль этой группы в оценке эвтрофирования. Увеличение роли расселения при одновременном снижении вклада гидрохимических переменных в группах подвижных и планктонных диатомей указывает на их ограниченное использование в мониторинге эвтрофирования Ладожского озера.

*Ключевые слова:* диатомовые водоросли, перифитон, функциональные группы, расселение, мониторинг

Диатомовые водоросли перифитона принадлежат к одному из наиболее часто используемых сообществ в биомониторинге поверхностных вод благодаря их высокой чувствительности к изменению качества водной среды. На основе диатомовых водорослей в Западной и Центральной Европе разработано большое количество аутэкологических индексов качества воды [1], среди которых наиболее известны трофический диатомовый индекс TDI [2], биологический диатомовый индекс BDI [3] и индекс специфической поллютант-чувствительности IPS [4]. Однако тот факт, что в основе аутэкологических индексов лежат таксономические единицы (виды и роды), накладывает определенные ограничения на их применение. Во-первых, видовые списки содержат большое количество редких видов, экологические предпочтения которых недостаточно изучены [5]. Во-вторых, часто в различных европейских индексах экологические оптимумы одних и тех же видов не совпадают, поскольку индексы разрабатывались в отдельных географических регионах с ограниченным диапазоном средовых факторов. Это приводит к необходимости разработки специфичных региональных индексов, учитывающих локальные особенности окружающей среды и видового состава диатомовой флоры [6,7].

В последнее десятилетие в экологии диатомовых водорослей перифитона широкое применение получил подход, основанный на применении функциональных групп (или гильдий) видов, сходных по морфологическим и физиологическим особенностям [8]. В основе данного подхода лежат представления об адаптивных стратегиях, благодаря которым в эволюционном временном масштабе у разных биологических видов в одинаковых условиях среды формируются сходные морфологические и физиологические приспособления. Согласно гипотезе экологической избыточности среди членов одной гильдии всегда найдутся такие виды, которые займут место исчезающего вида, тем самым поддерживая устойчивость сообщества к действию нарушений [9]. Анализ функционального разнообразия сообществ позволяет провести сравнение экосистем из разных регионов мира [10]. Географически удаленные озера могут значительно различаться по видовому составу, но быть сходными по функциональным характеристикам сообществ.

Виды микроводорослей со сходными адаптивными стратегиями принято называть жизненными формами. Все многообразие жизненных форм диатомовых водорослей по

морфологии и характеру прикрепления к субстрату можно разделить на три функциональные группы – низкорослые, высокорослые и подвижные формы [11]. На основе эмпирических данных было установлено, что диатомовые водоросли из разных групп адаптированы к различным уровням гидродинамического нарушения и обеспеченности ресурсами. Низкорослые диатомеи благодаря плотному прикреплению к субстрату устойчивы к физическому нарушению, и поэтому доминируют в условиях повышенной гидродинамики среды. Напротив, слабо приспособленные к условиям турбулентности высокорослые и подвижные диатомеи преобладают в спокойных гидродинамических условиях, при которых реализуются их преимущества в конкуренции за ресурсы. Высокососые и подвижные диатомеи обладают преимуществами в конкуренции за биогенные вещества и освещенность, поскольку высокорослые формы способны получать необходимое количество ресурсов благодаря вертикальной ориентации в пространстве, а подвижные формы могут избегать истощенные ресурсами местообитания внутри слоя перифитона.

Биогенные вещества и гидродинамический режим стоят в ряду первостепенных факторов формирования донных сообществ диатомовых водорослей на литорали больших озер [12-14]. Кроме того, известно, что в больших озерах горизонтальное распределение литорального фитопланктона формируется под действием прибрежных течений [15], которые играют важную роль в распространении микроводорослей. В настоящем исследовании оценивалась относительная роль эвтрофирования, гидродинамического режима и процессов расселения в пространственной изменчивости функциональных групп диатомовых водорослей на литорали Ладожского озера. Чтобы выяснить потенциальную возможность использования функциональных групп в мониторинге эвтрофирования, основным вопросом было определить, какая из групп имеет наиболее тесную связь с изменением качества воды.

Отбор проб диатомового перифитона проводился в 2006 г. с погруженных частей тростника на 25 станциях в литоральной зоне Ладожского озера. Исследование охватывало все три геоморфологических района Ладоги: северный шхерный район, район открытых берегов восточного и западного побережья и мелководный южный район. Одновременно с отбором проб перифитона измерялась температура воды, и отбирались пробы для определения гидрохимических показателей – концентрации общего фосфора ( $P_{\text{общ}}$ ), удельной электропроводности и рН.

Определение и подсчет диатомовых водорослей проводили в постоянных препаратах под световым микроскопом Carl Zeiss AxioImager.D1. 144 вида диатомовых водорослей были разделены на четыре группы: низкорослые (занимавшие 44,7 % от общей численности), высокорослые (37,8 %), подвижные (11,2 %) и планктонные (6,7 %) [16].

Для оценки влияния гидродинамического режима все литоральные станции были подразделены на три геоморфологических типа – открытая литораль, заливы и прибрежные ветланды [17]. Открытая литораль (9 станций) встречалась в шхерном районе и районе открытых берегов; заливы (11 станций) преобладали в шхерном районе и отсутствовали в южном; прибрежные ветланды (5 станций) находились только в южном районе. Прибрежные ветланды отличались наибольшим развитием тростниковых зарослей, достигающих ширины 100 и более метров. Геоморфологическое строение литорали на станциях отбора проб также отражали следующие параметры, определенные по топографической карте (масштаб 1:25000) – уклон дна (до изобаты 5 м) и открытость литорали. Прибрежные ветланды характеризовались значительно более пологим уклоном дна (0.11%) в сравнении с открытой литоралью (1.24%) и заливами (1.92%), что указывало на более спокойный гидродинамический режим на южном побережье Ладоги [16]. Тип литорали использовался в качестве номинальной переменной, а уклон дна и открытость литорали – в качестве количественных переменных.

Чтобы оценить влияние пространственного расположения станций использовался PCNM-метод (principal coordinates of neighbour matrices – главные координаты соседства матриц) [18], выполненный при помощи функции *pcnm* в статистической среде R [19]. Путем усечения матрицы Эвклидовых расстояний между географическими координатами станций отбора проб были сгенерированы пространственные переменные (S), позволяющие моделировать широко- и узко-масштабные пространственные автокорреляционные зависимости. В результате было получено 17

пространственных переменных. Первые переменные с высокими факторными нагрузками выражают автокорреляционные зависимости в масштабе всей площади исследования; последние переменные с низкими факторными нагрузками выражают автокорреляцию между соседними станциями [20].

Оценка влияния локальных гидрохимических и геоморфологических факторов и пространственного расположения станций на видовую структуру функциональных групп диатомовых водорослей проведена при помощи оценивания компонент дисперсии многомерных данных [21] на основе частного анализа избыточности (redundancy analysis, RDA) [22], выполненного при помощи функции *varpat* в R пакете *vegan* [23]. Первоначальный отбор переменных был произведен процедурой прямой селекции (forward selection) при помощи функции *ordiR2step*, доступной в R пакете *vegan* [23].

Исследование особенностей пространственного распределения диатомовых водорослей перифитона в Ладожском озере показало, что разнородные по своей геоморфологии прибрежные районы Ладоги характеризовались специфическим составом функциональных групп [16]. В мелководном южном районе доминировали слабоустойчивые к волновому воздействию высокорослые и подвижные диатомеи. В северном шхерном районе и районе открытых берегов доминировали адаптированные к интенсивному волновому воздействию низкорослые диатомеи. Это доказывает, что в сообществе перифитона виды диатомей с одинаковыми морфологическими чертами выполняют сходные экологические функции.

Результаты частного RDA анализа показали, что относительная роль факторов среды и процессов расселения в пространственной изменчивости видовой структуры каждой из четырех функциональных групп диатомовых водорослей существенно различался (таблица 1).

Таблица 1

Результаты частного RDA анализа для экологических групп диатомовых водорослей. Доли объясненной вариации гидрохимическими (CHE), физическими (PHY) и пространственными (SPA) переменными показаны как проценты от общей дисперсии. В скобках указаны факторы среды и пространственные переменные (S), оказавшие статистически значимый вклад в изменчивость экологических групп

Функциональная группа	CHE, %	PHY, %	SPA, %	Остаточная дисперсия, %
Низкорослые	22.2 ( $P_{\text{общ}}$ , pH)	17.7 (тип литорали)	13.0 (S2)	46.3
Высокорослые	9.5 ( $P_{\text{общ}}$ )	8.9 (тип литорали)	9.5 (S6, S11, S15)	75.6
Подвижные	2.2 ( $P_{\text{общ}}$ )	6.0 (уклон дна)	5.1 (S12)	85.3
Планктонные	1.6 (pH)	13.2 (температура)	26.7 (S4, S14, S15)	69.4

В группе низкорослых диатомей гидрохимические переменные, отобранные процедурой прямой селекции, включали  $P_{\text{общ}}$  и pH. Изменения видовой структуры низкорослых диатомей в основном зависели от качества воды, поскольку одна пятая часть в общей изменчивости данных объяснялась содержанием  $P_{\text{общ}}$ . Из физических переменных геоморфологический тип литорали вносил сравнимую по величине долю в изменчивость видовой структуры низкорослых диатомей. На пространственное расположение приходилась почти вдвое меньшая доля в изменчивости данных по сравнению с гидрохимическими переменными. Из 17 пространственных переменных только одна переменная (S2), отвечающая за широкомасштабные зависимости, оказалась связанной с изменчивостью структуры в группе (таблица 1).

В группе высокорослых диатомей из гидрохимических переменных статистически значимую связь с изменением видовой структуры показало только содержание  $P_{\text{общ}}$ . Вклады

гидрохимических, геоморфологических и пространственных переменных в изменчивость видовой структуры высокорослых диатомей были сопоставимы по величине. Статистически значимые пространственные переменные включали две переменные (S6 и S11), отвечающие за среднемасштабные пространственные зависимости, и одну переменную (S15), отражающую зависимость между соседними станциями (таблица).

В группе подвижных диатомей вклад единственной статистически значимой гидрохимической переменной ( $P_{\text{общ}}$ ) уступал по величине (в 2 раза и более) частным вкладам пространственных и геоморфологических переменных. Связанные с пространственным расположением станций изменения видовой структуры выражались зависимостью от одной переменной (S12), отвечающей за автокорреляцию структуры в среднем масштабе исследования.

В группе планктонных диатомей вклад единственной гидрохимической переменной (рН) был незначителен по сравнению с вкладом физических (температура воды) и пространственных переменных. За наибольшую фракцию в общей изменчивости видовой структуры в группе отвечали пространственные переменные, в совокупности объяснявшие, одну четвертую ее часть. Одна из них (S4) отвечала за широкомасштабные пространственные зависимости, две остальных (S14 и S15) – за узкомасштабные зависимости.

Результаты частного RDA анализа свидетельствуют о том, что межгрупповые различия видов в способности к расселению, обусловленные разным характером их прикрепления к субстрату, приводят к различиям в величине отклика на изменение содержания  $P_{\text{общ}}$ . Причем чем выше интенсивность пассивного переноса у видов из-за отсутствия специализированных приспособлений к прикреплению (подвижные и планктонные диатомей), тем слабее выражены изменения видовой структуры в группе вдоль градиента эвтрофирования. В этой связи закономерно увеличение роли узко- и среднемасштабных пространственных переменных, полученных в результате применения PCNM-метода, в объяснении изменчивости структуры в группах слабо прикрепленных (высокорослых) и неприкрепленных (подвижных и планктонных) диатомей. Статистически значимая зависимость видовой структуры от пространственных переменных с низкими факторными нагрузками указывает на эффект повышенной скорости расселения, приводящей к сглаживанию различий (гомогенизации) видового состава между соседними станциями [24]. Высокая скорость иммиграции из соседних местообитаний позволяет существовать в данной точке пространства видам, которые иначе были бы вытеснены из-за несоответствия локальным условиям среды. Напротив, зависимость видовой структуры от пространственных переменных с высокими факторными нагрузками может указывать на то, что скорость расселения видов низкая и пространственная структура сообщества формируется в условиях ограниченного распространения [24]. Однако маловероятно, что диатомовые водоросли испытывают ограничение в распространении в масштабе акватории Ладожского озера. Очевидно, зависимость структуры низкорослых диатомей от широкомасштабной пространственной переменной косвенно указывает на влияние прибрежных течений, которые способствуют распространению микроводорослей в литоральной зоне Ладоги в направлении преобладающих ветров.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о неравноценном значении функциональных групп диатомовых водорослей в мониторинге эвтрофирования. Содержание  $P_{\text{общ}}$  оказывало наибольшее влияние на изменчивость низкорослых диатомей, указывая на важную роль этой группы в оценке эвтрофирования. Увеличение роли расселения при одновременном снижении вклада гидрохимических переменных в группах подвижных и планктонных диатомей указывает на их ограниченное использование в мониторинге эвтрофирования Ладожского озера. Результаты проведенного исследования также указывают, что расселение – один из ключевых факторов формирования пространственной структуры диатомовых водорослей перифитона в литоральной зоне больших озер.

Литература:

1. Kelly M. Data rich, information poor? Phytobenthos assessment and the Water Framework Directive // *Eur. J. Phycol.* 2013. V. 48, No. 4. P. 437-450.

2. Kelly M. G., Whitton B. A. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers // *J. Appl. Phycol.* 1995. V. 7. No. 4. P. 433-444.
3. Coste M., Boutry, S., Tison-Rosebery J., Delmas F. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): description and efficiency of the new version (BDI-2006) // *Ecol. Indic.* 2009. V. 9. P. 621-650.
4. Cemagref. Etude de méthodes biologiques quantitatives d'appréciation de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon-A.F.B. Rhône-Méditerranée-Corse. Lyon, 1982. 218 pp.
5. Rimet F., Bouchez A. Biomonitoring river diatoms: implications of taxonomic resolution // *Ecol. Indic.* 2012. V. 15. P. 92-99.
6. Kelly M. G., Cazaubon A., Coring E., Dell'Uomo A. et al. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe // *J. Appl. Phycol.* 1998. V. 10, No. 2. P. 215-224.
7. Rusanov A. G., Stanislavskaya E. V. River pollution in Ladoga basin: Estimation based on diatom index // *Water Resources.* 2011. V. 38, No. 1, P. 95-106.
8. Tapolczai K., Bouchez A., Stenger-Kovacs C., Padisak J., Rimet F. Trait-based ecological classifications for benthic algae: review and perspectives // *Hydrobiologia.* 2016. V. 776, No. 1. P. 1-17.
9. Walker B. H. Biodiversity and ecological redundancy // *Conserv. Biol.* 1992. V. 6. No. 1. P. 18-23.
10. Salmaso N., Naselli-Flores L., Padisak J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology // *Freshwater Biol.* 2015. V. 60. P. 603-619.
11. Passy S. I. Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters // *Aquat. Bot.* 2007. V. 86. P. 171-178.
12. Davydova N. N., Kukkonen M., Simola H., Subetto D. A. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages // *Boreal Environ. Res.* 1999. V. 4. P. 269-275.
13. Pla S., Paterson A. M., Smol J. P. et al. Spatial variability in water quality and surface sediment diatom assemblages in a complex lake basin: Lake of the Woods, Ontario, Canada // *J. Great Lakes Res.* 2005. V. 31. P. 253-266.
14. Kireta A. R., Reavie E. D., Danz N. P. et al. Coastal geomorphic and lake variability in the Laurentian Great Lakes: implications for a diatom based monitoring tool // *J. Great Lakes Res.* 2007. V. 33. P. 136-153.
15. Verhagen J. H. G. Modelling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents // *Limnol. Oceanogr.* 1994. V. 39, No. 7. P. 1551-1565.
16. Русанов А. Г. Пространственное распределение диатомовых водорослей перифитона в литоральной зоне Ладожского озера // *Вода: химия и экология.* 2015. № 11 (89). С. 50-59.
17. Keough J. R., Thompson T. A., Guntenspergen G. R., Wilcox D. A. Hydrogeomorphic factors and ecosystem responses in coastal wetlands of the Great Lakes // *Wetlands.* 1999. V. 19. P. 821-834.
18. Borcard D., Legendre P. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices // *Ecol. Modelling.* 2002. V. 153. P. 51-68.
19. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing / R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2013. ISBN: 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>
20. Dray S., Legendre P., Peres-Neto P. R. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM) // *Ecol. Modelling.* 2006. V. 196. P. 483-493.
21. Anderson M. J., Gribble N. A. Partitioning the variation among spatial, temporal and environmental components in a multivariate data set // *Aust. J. Ecol.* 1998. V. 23. P. 158-167.
22. Rao C. R. The use and interpretation of principal component analysis in applied research // *Sankhyā Ser A.* 1964. V. 26. P. 329-358.
23. Oksanen J., Blanchet F. G., Kindt R., Legendre P., Minchin P. R., O'Hara R. B. et al. Package 'vegan'. 2013. <http://cran.r-project.org>, <http://vegan.r-forge.r-project.org/>.

24. Heino J., Melo A. S., Siqueira T., Soininen J. et al. Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: patterns, processes and prospects // *Freshwater Biol.* 2015. V. 60. P. 845-869.

## **USING FUNCTIONAL GROUPS OF PERIPHYTIC DIATOMS FOR MONITORING EUTROPHICATION OF THE LAKE LADOGA**

Alexander G. Rusanov,  
Ph.D., senior research scientist Laboratory of Hydrobiology  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: a\_rusanov@yahoo.com

*Abstract:* Assessment of potential use of functional groups of periphytic diatoms for monitoring eutrophication of littoral zone of the Lake Ladoga was carried out using variation partitioning based on partial redundancy analysis (pRDA). Results of pRDA showed that the relative role of environmental factors and dispersal processes in spatial variation of species composition for each of four diatom functional groups (low-profile, high-profile, motile and planktonic) is different. Environmental factors played the most significant role in groups of low-profile and high-profile diatoms. Total phosphorus influenced mainly the variation in low-profile diatoms that suggests the important role of this group in eutrophication assessment. Increasing role of dispersal with simultaneously decreasing contribution of hydrochemical variables in groups of motile and planktonic diatoms indicates their limited use for monitoring eutrophication in the Lake Ladoga.

*Keywords:* diatoms, periphyton, functional groups, dispersal, monitoring

## ДНО ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА. ИЗВЕСТНЫЕ ФАКТЫ И НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Владимир Николаевич Рыбакин  
к.ф.-м-н., заведующий лабораторией  
физических методов исследований ФГБУН  
Института озероведения Российской академии наук  
E-mail: [v.n.rybakin@gmail.com](mailto:v.n.rybakin@gmail.com)

*Аннотация:* Дно Ладожского озера до сих пор является малоизученным объектом. Наблюдения за озером и его исследования продолжаются на протяжении нескольких веков. Процессы, которые постоянно происходят на дне, во многом определяют гидрологическое, биологическое, физическое и экологическое состояние озера и не всегда находят однозначное объяснение.

В работе приведены некоторые малоизвестные феномены и новые данные о процессах, происходящих на дне и на акватории озера. Намечены основные перспективные направления дальнейших исследований, которые позволят получить более полное представление об особенностях Ладожского озера.

*Ключевые слова:* геологические разломы, барантиты, сейсмические явления, субаквальная разгрузка подземных вод

Известно, что новгородцы на протяжении нескольких веков имели на Ладоге торговый и военный флот и накопленные ими географические сведения разными путями попадали к западноевропейским картографам. На одной из первых карт Московского государства изготовленной средневековым немецким учёным Себастьяном Мюнстером в 1544 году обозначено озеро Ладога. На чертеже Руси 1600 года составленном царевичем Фёдором Годуновым Ладожское озеро прописано с большой точностью очертаний берегов. В середине XVIII века была составлена «Карта Ладожского озера и канала», на которой показаны береговая линия и трасса канала с указанием его профилей.

Сильное сейсмическое явление в Ладожско-Ботнической зоне, вблизи Ладожского озера, было зафиксировано в 1857 году и имело магнитуду 4.4 [1].

На Ладожском озере сейсмические явления проявляются в виде доносящегося из-под воды раскатистого гула, который получил название «бронтиты» («баррантиты»). Известны подобные описания их в отдалённом прошлом - например, свои впечатления о баррантите оставил Александр Дюма, посетивший Валаам в 1858 году [2].

По описаниям очевидцев, суда в районах южнее о. Валаам, попадали в кипящие «котлы», вода в которых оставалась холодной, а само кипение распространялось «полосами». Отмечены случаи, когда на побережье в хорошую и тихую погоду неожиданно обрушиваются волны высотой до 3 метров. Так 26 июня 1954 году в деревне Леднева от таких волн погибли (утонули) 8 жителей, более 50 человек находившихся в тот момент на берегу были ранены. Были разрушены более 10 домов [3].

Все эти явления связаны с сейсмичностью зоны Ладожского озера. До настоящего времени многие детали геологического строения и истории геологического развития Ладожского озера и всей системы «озеро - река - море» оставались невыясненными. Большинство геологических работ в озере носило эпизодический характер и во многих случаях были связаны с поверхностью дна и самой верхней частью донного геологического разреза. Серьезная попытка систематического геологического изучения Ладожского озера была предпринята ВСЕГЕИ в конце 80-х годов прошлого столетия при проведении геологической съемки дна озера в масштабе 1:200 000 с составлением комплекса государственных геологических карт соответствующего масштаба. Однако, по ряду причин, эти работы были прекращены.



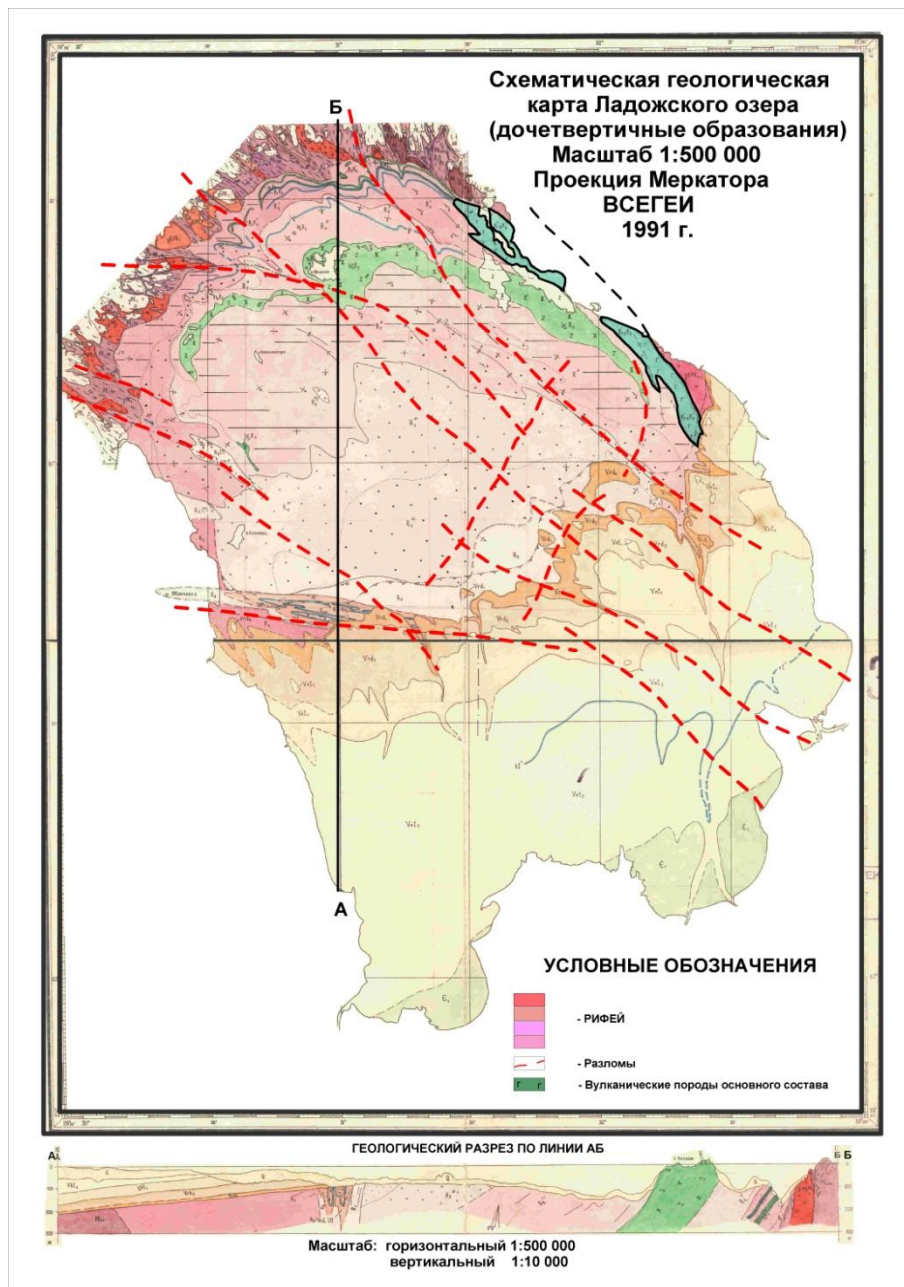
Собранный в то время, по существу первый геологический материал, позволил составить принципиальную схему состава, строения и возраста геологических образований в озерной котловине и сформулировать целый ряд вопросов требующих дальнейшего изучения рис.1. [4].

Котловина Ладожского озера сформировалась в пределах фрагмента зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты, осложненного крупной рифейской грабен-синклиналью, названной Ладожско-Пашской. Это обстоятельство определяет специфику строения дна бассейна. Как и повсеместно, в зоне перехода от щита к плите традиционно развиты структурные комплексы фундамента архейского либо раннепротерозойского возраста; комплексы плитного чехла, начавшие формироваться с позднего венда. Особенности же котловины связаны с распространением рифейского и позднерифейско-ранневендского комплексов, слагающих грабен-синклиналь и доминирующих на дне бассейна.

Более понятная картина складывается при подробном изучении рельефа поверхности озерного дна (данные ИНОЗ РАН, ВСЕГЕИ, ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ). Насыщенность геоморфологическими фактами дает общее представление о строении донного рельефа. В то же время отсутствие систематических площадных геоморфологических исследований с применением современных методов оставляет открытыми многие вопросы строения, происхождения и возраста донного, затопленного и, тем более, погребенного рельефа в пределах озерной котловины.

Практически отсутствуют прямые гидрологические данные о весьма вероятном уникальном артезианском бассейне в контурах современного озера, который не контактирует с подземными минерализованными водами Региона.

Для рельефа дна Ладожского озера характерно постепенное увеличение глубины с юга на север. Дно северной части неровное, изборозженное впадинами. Здесь преобладают глубины, превышающие 100 метров. Именно на севере, у островов Кильписарет, отмечена максимальная глубина озера, равная 230 метрам. Глубина впадины против Куркийокских шхер достигает 220 метров. Недалеко от Приозерска, а также около Сортавальских шхер известны глубины до 150 метров. Рельеф дна южной части спокойный и отличается большей сглаженностью. Глубины в этой части озера колеблются в пределах 20 - 50 метров и близки к средней глубине водоема - 51 метр.



*Рис.1. Схема состава, строения и возраста геологических образований в озерной котловине.*

В пределах Ладожской структуры отмечены многочисленные разрывные нарушения, расчленяющие ее на систему параллельных горстов и грабенов северо-западного простирания. Тектонические движения имеют место и в настоящее время. Исследователями обнаружено также большое число палеосейсмодетформаций возрастом от 1 до 10 тыс. лет. С разломной тектоникой, а также с влиянием последнего оледенения (10–25 тыс. лет назад) связана морфология дна Ладоги. В северной части отмечается шхерный тип берегов с перепадами глубин до 150 м, где картируются вытянутые в северо-западном направлении и субширотно впадины с заметными контрастами глубин [5].

Наибольшую опасность для рассматриваемого региона представляет - региональная геологическая структура северо-западного простирания - зона надвигового сочленения двух глобальных разновозрастных блоков земной коры [4]. Структура имеет крупные размеры: ширину – 70 км и длину до 500 км (протягивается от Ладожского озера к северо-западу в сторону шведского берега Ботнического залива). Ладожско-Ботническая зона сложно структурирована, некоторые образующие ее разломы или их сегменты длиной до 100 км сейсмичны. Зона в целом характеризуется сравнительно высоким уровнем активности, достаточно сказать, что значительная

часть землетрясений составленного каталога приурочена к ней. В западной части активен весь участок зоны от Ладожского озера до Ботнического залива. Юго-восточное окончание Ладожско-Ботнической зоны сейсмической активности – Ладожская рифтогенная структура рифейского возраста, характеризуется слабой сейсмической активностью (Валаамская группа событий). Исторические Валаамские землетрясения начала 20 века с магнитудой М 2-3 вошли во все известные опубликованные сводки землетрясений Европы, Фенноскандии, СССР. Землетрясения в настоящее время детально изучаются по первоисточникам [6, 7]. Все разломы могут серьезным образом влиять на качество воды в Ладожском озере - за счет эманации газов, выбросов подземных вод, наночастиц и пр. изменять экологический статус озера.

По рассказам очевидцев, в 1924 г. на дне Ладожского озера, в окрестностях архипелага островов Валаам, в результате (предположительно) сдвига в земной коре произошло опускание отдельного блока на 50 метров. Об этом говорили рыбаки, которые в обычном месте ставили сети, но дна не достигли. В 2 часа ночи 18 августа 1926 г. происходит сильное землетрясение в районе озера Ковдозера. Содрогаются станы изб, сдвигаются различные предметы мебели в домах, слышится звон посуды

В северной (глубоководной) части Ладожского озера породы рифейского комплекса обнажаются на пологих склонах его дна и в виде уступов и обрывов. В этой части озера в 2015 – 2016 гг. по профилю субпараллельному береговой линии были проведены работы по опробованию разреза водной толщи. Данные изотопных исследований в акватории Ладожского озера, совместно с анализом результатов региональных работ на Карельском перешейке, позволяют предположить, что имеет место заметная субаквальная разгрузка подземных вод в Ладожское озеро [8]. Наиболее вероятно, что источником данной разгрузки являются рифейские песчаники Ладожского грабена, содержащие изотопически аномально легкую воду, исходное происхождение которой следует связать с существованием в прошлом Балтийского ледникового озера. Последние расчеты показали, что доля субаквальной разгрузки подземных вод составляет 4.5% водного баланса Ладожского озера.

#### Литература:

1. Ahjos, T., and M. Uski , Earthquakes in northern Europe in 1375–1989, in *The European Geotraverse, Part 8*, R. Freeman and S. Muller (Editors), *Tectonophysics* 207, 1992, p.1–23.
2. Ассиновская Б.А., Никонов А.А. Загадочные явления на Ладожском озере. // *Природа*. 1998. N 5. - С. 49-52.
3. Никонов А.А. Восточно-Ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года // *Физика Земли*. 2005. No 7. - С. 1–5.
4. Амантов А.В. Этапы геологического развития Ладожского озера // *Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / РАН, РГО. – СПб. 1993. – С. 5–13.*
5. Ладожское озеро, атлас. – СПб.: ИНОЗ РАН, - С. 2002. – 128.
6. Ассиновская Б.А., Никонов А.А., 1998. Загадочные явления на Ладожском озере. «Природа», Москва. 5:49-53.
7. Assinovskaya B.A. Ladoga seismic events // *Journal Geophysical Research Abstracts*. 1999.
8. Румянцев В.А., Рыбакин В. Н., Токарев И.В. Исследование Ладожского озера и его притоков с помощью изотопных индикаторов // *Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции "Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.", Петрозаводск, 6-11 июля 2015 г. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. - т. 1. - С. 468 – 472.*

**THE BOTTOM OF LAKE LADOGA.  
KNOWN FACTS AND NEW RESEARCH DIRECTIONS**

Vladimir Nikolaevich Rybakin  
Ph.D., head of the laboratory  
physical research methods of FGBUN  
Institute of Limnology Russian Academy of Science  
E-mail: [v.n.rybakin@gmail.com](mailto:v.n.rybakin@gmail.com)

*Abstract:* the Bottom of lake Ladoga is still poorly known object. Monitor the lake and his studies have continued over several centuries. Processes occurring on the bottom, largely determine the hydrological, biological, physical and environmental condition of the lake and not always find a clear explanation.

The paper presents some little-known phenomena and new data about the processes occurring on the bottom and on the waters of the lake. The main promising directions for further research that will allow you to get a better idea about the peculiarities of the Ladoga lake.

*Keywords:* geological faults, barrentine, seismic events, subaqueous discharge of groundwaters

**НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВОЙ И ГОЛОЦЕНОВОЙ ИСТОРИИ  
ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Лариса Анатольевна Савельева,  
к.г.н., доцент кафедры геоморфологии,  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [l.savelyeva@spbu.ru](mailto:l.savelyeva@spbu.ru)

Андрей Александрович Андреев,  
к.г.н., научный сотрудник,  
Институт геологии и минералогии Кёльнского университета,  
Кёльн, Германия  
E-mail: [aandreev@uni-koeln.de](mailto:aandreev@uni-koeln.de)

Людмила Шумиловских,  
научный сотрудник,  
Институт растений университета Георга-Августа,  
Геттинген, Германия  
E-mail: [shumilovskikh@gmail.com](mailto:shumilovskikh@gmail.com)

Рафаэль Громиг,  
Институт геологии и минералогии Кёльнского университета,  
Кёльн, Германия  
E-mail: [gromigr@uni-koeln.de](mailto:gromigr@uni-koeln.de)

Анна Валерьевна Лудикова,  
к.г.н., научный сотрудник,  
ИНОЗ РАН

Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [ellerbeckia@yandex.ru](mailto:ellerbeckia@yandex.ru)

Дмитрий Александрович Субетто,  
д.г.н., профессор, директор,  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [subetto@mail.ru](mailto:subetto@mail.ru)

Григорий Борисович Федоров  
к.г.н., доцент кафедры геоморфологии,  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [g.fedorov@spbu.ru](mailto:g.fedorov@spbu.ru)

Себастиан Крастель,  
профессор, доктор,  
Институт геологических наук университета Христиана-Альбрехта,  
Киль, Германия  
E-mail: [skrastel@geophysik.uni-kiel.de](mailto:skrastel@geophysik.uni-kiel.de)

Бернд Вагнер,  
профессор, доктор,  
Институт геологии и минералогии Кёльнского университета,  
Кёльн, Германия  
E-mail: [wagnerb@uni-koeln.de](mailto:wagnerb@uni-koeln.de)

Мартин Меллес,  
профессор, доктор,  
Институт геологии и минералогии Кёльнского университета,  
Кёльн, Германия  
E-mail: mmelles@uni-koeln.de

*Аннотация:* В работе представлены результаты исследований по содержанию пыльцы и спор, зеленых пресноводных водорослей, цист динофлагеллят и первые результаты диатомового анализа колонки донных отложений Ладожского озера, мощностью 22,7 м. Накопление изученных отложений происходило в конце микулинского (эмского) межледниковья, позднеледниковье и голоцене.

*Ключевые слова:* Ладожское озеро, донные отложения, пыльца и споры, цисты динофлагеллят, пресноводные зеленые водоросли, диатомовые водоросли, микулинское (эмское) межледниковье, позднеледниковье, голоцен.

Палеолимнологические исследования донных отложений Ладожского озера ведутся с конца 50-х годов прошлого столетия. Биостратиграфическое расчленение донных отложений, а также палеорекострукции изменения растительности и климата на основе спорово-пыльцевого и диатомового анализов коротких колонок донных отложений мощностью до 1,5 м, впервые были выполнены в 60-х годах [2,3]. Позже, в 80-е годы, исследовались керны озерных осадков длиной до 4,5 м [4,5,8,13]. Так, было установлено, что подавляющая часть вскрытых отложений Ладожского озера сформировалась в позднеледниковье и голоцене, а наибольшие мощности накопились во время деградации последнего валдайского оледенения. Современные исследования маломощных колонок донных отложений охватывают только поздний голоцен [10]. Отличительной особенностью послеледниковых спорово-пыльцевых спектров изученных отложений является господство пыльцы сосны и ели. Следует отметить, что на спорово-пыльцевых диаграммах четко фиксируется переход от плейстоцена к голоцену, который выражен в смене спорово-пыльцевых спектров с господством пыльцы польней и маревых (время позднего дриаса) на спектры с господством пыльцы сосны и березы (пребореальный период голоцена). В более молодых голоценовых осадках значительных изменений в составе спорово-пыльцевых спектров не фиксируется, что затрудняет их периодизацию.

Представления о позднеплейстоценовом этапе развития Ладожского озера сложились в основном по результатам изучения разрезов, расположенных на территории, прилегающей к озеру [1,9,14]. В акватории озера известна лишь одна скважина близ маяка Осиновец, включающая мгинские отложения мощностью около 1 м [9], которые содержат морские диатомовые и фауну [12], но эти отложения не были изучены палинологически. Считается, что на дне Ладожского озера залегают в основном отложения, включающие морену валдайского оледенения и толщу перекрывающих ее поздне-послеледниковых осадков [6].

Для того, чтобы расширить представления о развитии Ладожского озера в четвертичном периоде в 2013 году в рамках российско-немецкого проекта PLOT (**P**aleo**l**imnological **T**ransect) были проведены сейсмоакустические исследования и бурение донных отложений, которые позволили вскрыть толщу осадков мощностью 22,7 м. К настоящему моменту получены данные по содержанию пыльцы, спор, а также различных палиноморф, включая зеленые пресноводные водоросли (*Pediastrum*, *Botryococcus*), цисты динофлагеллят и первые результаты диатомового анализа колонки PG 1310.

По результатам спорово-пыльцевого анализа построена диаграмма (Рис.1), на которой выделено 8 пыльцевых зон. Процентное содержание пыльцевых и споровых таксонов, а также колоний зеленых водорослей и цист динофлагеллят рассчитано от общей суммы пыльцы наземных растений за исключением водных.

Пыльцевая зона 1 (22,7–21,9 м) характеризуется низкой концентрацией микрофоссилий и содержит единичные пыльцевые зерна *Picea*, *Betula*, *Alnus*, *Corylus*, *Carpinus*, *Quercus*, *Artemisia*,

*Poaceae* и споры *Sphagnum*, а также единичные колонии пресноводных зеленых водорослей и цисты динофлагеллят.

Палинозона 2 (21,9–22,0 м) характеризуется значительно большей концентрацией микрофоссилий. В составе спорово-пыльцевых спектров доминирует пыльца *Betula* (20-35%) и *Alnus* (15-35%), сумма пыльцы широколиственных пород колеблется в пределах от 10% до 23%. Споры представлены, в основном, *Sphagnum* и *Polypodiaceae*. Количество колоний зеленых водорослей колеблется от 10% до 40%, цисты динофлагеллят составляют 5-7%.

Палинозона 3 (22,0–13,2 м). Концентрация микрофоссилий относительно высокая. В спектрах преобладает пыльца *Betula* (15-35%), *Alnus* (15-32%) и *Picea* (5-18%), сумма пыльцы широколиственных пород достигает 32%, а *Corylus* – 15%. Среди споровых по-прежнему преобладают *Sphagnum* и *Polypodiaceae*. Отмечается самое высокое для всего разреза содержание пресноводных зеленых водорослей (до 33%) и цист динофлагеллят (до 10%), включая морские и солоноватоводные виды. Зафиксированы створки морских и солоноватоводных диатомовых водорослей.

Палинозона 4 (13,2–8,0 м). Концентрация микрофоссилий резко падает. В спектрах преобладает пыльца *Betula* (15-45%) и *Alnus* (5-25%), присутствует пыльца *Pinus*, *Picea*, широколиственных пород. Возросло участие пыльцы трав: *Artemisia* – до 15-35%, *Poaceae* – до 10-20%, *Chenopodiaceae* – 10-15%. Количество колоний зеленых водорослей снизилось до 5-7%. Обнаружены лишь единичные цисты динофлагеллят, вероятно, переотложенного происхождения.

Палинозона 5 (8,0–5,9 м). Концентрация микрофоссилий низкая. Господствует пыльца *Betula* (15-20%) и *Pinus* (5-35%), резко увеличилось содержание пыльцы *Picea* до 10%. Значительно участие пыльцы трав (*Artemisia*, *Poaceae*, *Chenopodiaceae*, *Cyperaceae*).

Палинозона 6 (5,9–2,0 м). Концентрация микрофоссилий низкая. Резко сокращается содержание пыльцы древесно-кустарниковой группы. Преобладает пыльца трав, среди которой доминирует *Artemisia* (до 65%), *Poaceae* (до 35%), *Chenopodiaceae* (до 25%) и *Cyperaceae* (до 17%). Участие трав максимально для всего разреза.

Палинозона 7 (2,0–1,2 м). Резко возрастает концентрация микрофоссилий. В спектрах доминирует пыльца *Pinus* (20-45%), *Betula* (30-45%), резко сократилось содержание пыльцы трав.

Палинозона 8 (1,2–0 м). Концентрация микрофоссилий очень высокая и является максимальной для всего разреза. В спектрах доминирует пыльца *Pinus* (25%-65%), *Picea* (10-25%), *Betula* (15-20%) и *Alnus* (10-30%), количество пыльцы широколиственных пород колеблется от 3% до 15%.

Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что формирование осадков в интервале глубин от 21,9 м до 13,2 м (палинозоны 2 и 3) происходило в климатических условиях благоприятнее современных, которые можно сопоставить с микулинским межледниковьем. Причем значительное участие пыльцы ели (палинозона 3) указывает на вторую половину или даже конец этого межледниковья. Обилие морских динофлагеллят и морских диатомовых водорослей свидетельствует о существовании морского бассейна, в состав которого входило и Ладожское озеро [15]. В тоже время, наличие слабо солоноватоводных и пресноводных диатомей, а также обилие пресноводных зеленых водорослей может свидетельствовать о мелководном и сильно распресненном водоеме.

Формирование осадков в интервале от 13,2 м до 2,0 м по нашим данным происходило в условиях холодного позднеледникового времени (палинозоны 4, 5 и 6). Низкое содержание зеленых пресноводных водорослей может указывать на существование глубоководного водоема и холодных олиготрофных условий. Эти данные хорошо согласуются с представлениями о том, что в это время в пределах котловины Ладожского озера существовал глубоководный водоем, являвшийся восточным плесом Балтийского ледникового озера [7,11, 16].

Осадконакопление верхней толщи, мощностью 2,0 м происходило в голоцене (палинозоны 7 и 8). Обилие пыльцы древесных пород свидетельствует о благоприятных климатических условиях близких к современным. Водоем по-прежнему, оставался глубоководным.

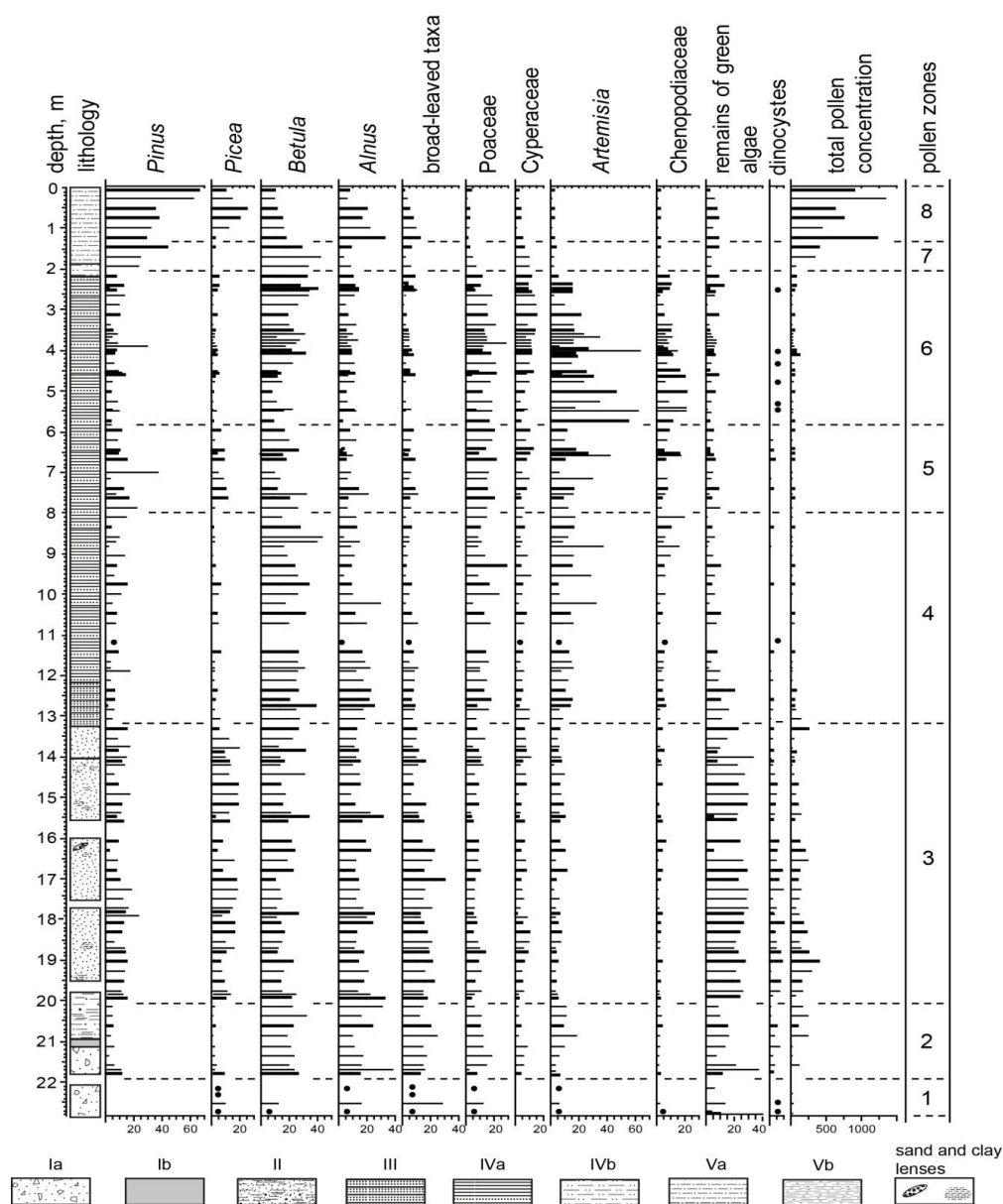


Рис. 1. Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений Ладожского озера (колонка PG1310). Литология: Ia - слоистая алевритистая глина с мелкозернистым песком; Ib - алевритистая глина; II - алевритистая глина переслаивающаяся с мелкозернистым песком; III - песок; IVa и IVb - алевритистая глина с мелкозернистым песком; Va - алевритистая глина переслаивающаяся с песком; Vb - мелко- и крупнозернистый песок с галькой; sand and clay lenses - линзы песка и глин.

Литература:

1. Абакуменко Г. С., Ладышкина Т. Е., Салтыкова В. Ф., Семичева В. И., Усикова Т. В. Морские межледниковые отложения на севере Карельского перешейка // Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода севера европейской части СССР. Петрозаводск, - 1977. - С.93-97.



2. Абрамова С. А., Давыдова Н. Н. К палеолимнологии Ладожского озера // Изв. ВГО, - 1966. - Т.98, №1. - С.19-25.
3. Абрамова С. А., Давыдова Н. Н., Квасов Д. Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-Запада. / Отв. Ред. С.В. Калесник. Л., - 1967. - С. 113-132.
4. Арсланов Х. А., Гей Н. А., Давыдова Н. Н., Джинорижзе Р. Н., Кошечкин Е. И., Пушенко М. Я., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто, Д. А., Хомутова В. И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера // Изв. РГО, - 1996. - Т.128, Вып. 2. - С.12-21.
5. Давыдова Н. Н., Рыбалко А. Е., Спиридонова Е. А., Субетто Д. А. Новые данные по стратиграфии донных отложений Ладожского озера // Изучение озерно-болотных формаций в целях палеогеографических реконструкций, Таллин, - 1986. - С. 24-30.
6. Давыдова Н. Н., Делюсина И. В., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене-голоцене // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. Сб. научн. тр., СПб, изд. РГО, - 1993. - С. 14-24.
7. Давыдова Н. Н., Рыбалко А. Е., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Позднеплейстоценовая история Ладожского озера // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины / Ред. Хомутова В. И., Давыдова Н. Н., Раукас А. В., Румянцев В. А. СПб., - 1998. - С 134-140.
8. Делюсина И. В. Спорово-пыльцевой анализ донных отложений Ладожского озера // Вест. ЛГУ. Геология. География. Вып.3. - 1988.- С. 106-108.
9. Малаховский Д. Б., Спиридонова Е. А., Рухина Е. В. Верхнечетвертичные отложения. Микулинский (мгинский) горизонт // Геоморфология и четвертичные отложения Северо-Запада европейской части СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). Изд. Наука, Л., - 1969. - С.111-133.
10. Сапелко Т. В., Игнатьева Н. В., Кузнецов Д. Д. Антропогенные и природные факторы развития Ладожского озера в позднем голоцене по данным комплексного анализа донных отложений // Сохраним природное и культурное наследие Ладожского озера. Сборник научных трудов. СПб. – 2011. - С.170-181.
11. Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб. Изд. РГПУ им. А.И. Герцена. - 2009. - 339 с.
12. Черемисинова Е. А. Морская диатомовая флора четвертичных отложений котловины Ладожского озера//Бюлл. Комисс. По изуч. Четвертичн. Периода АН СССР, М., 1957. - № 21. С. 105-112.
13. Delusin I. The Holocene pollen stratigraphy of lake Ladoga and the vegetational history of its surroundings. Helsinki. - 1991. - 66 p.
14. Ikonen L., Ekman I. Biostratigraphy of the Mikulino interglacial sediments in NW Russia: the Petrozavodsk site and a literature review. Ann. Acad. Sci. Fenn. 161, - 2001. – P.1-88.
15. Miettinen A., Head J.H., Knudsen K.L. Eemian sea-level high stand in the eastern Baltic Sea linked to long-duration White Sea connection // Quaternary Science Reviews, 86, - 2014. - P.158-174.
16. Subetto D., Davydova N., Rybalko A. Contribution to tyhe lythostratigraphy and history of Lake Ladoga//Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 140, - 1998. - P.113-119.

## **NEW DATA ON LATE PLEISTOCENE AND HOLOCENE HISTORY OF THE LAKE LADOGA: RESULTS OF PALYNOLOGICAL INVESTIGATIONS**

Dr. Larisa Anatolievna Savelieva  
 associate professor,  
 Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University,  
 Saint-Petersburg, Russia  
 E-mail: l.savelieva@spbu.ru

Dr. Andrey Andreev  
Institute of Geology and Mineralogy University of Cologne,  
Köln, Germany  
E-mail: aandreev@uni-koeln.de

Dr. Lyudmila Shumilovskikh  
Georg-August-Universität  
Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften  
Abteilung Palynologie und Klimadynamik,  
Göttingen, Germany  
E-mail: shumilovskikh@gmail.com

Raphael Gromig  
Institute of Geology and Mineralogy University of Cologne,  
Köln, Germany  
E-mail: gromigr@uni-koeln.de

Dr. Anna Valerievna Ludikova  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences,  
Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: ellerbeckia@yandex.ru

Prof. Dr. Dmitri Aleksandrovich Subetto  
Head of Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences,  
Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: subetto@mail.ru

Dr. Grigori Borisovich Fedorov  
associate professor, Institute of Earth Sciences,  
Saint-Petersburg State University,  
Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: g.fedorov@spbu.ru

Prof. Dr. Sebastian Krastel  
Institute of Geosciences Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,  
Kiel, Germany  
E-mail: skrastel@geophysik.uni-kiel.de

Prof. Dr. Bernd Wagner  
Institute of Geology and Mineralogy University of Cologne,  
Köln, Germany  
E-mail: wagnerb@uni-koeln.de

Prof. Dr. Martin Melles  
University of Cologne Institute of Geology and Mineralogy,  
Köln, Germany  
E-mail: mmelles@uni-koeln.de

*Abstract:* Results of studies of pollen and spores, freshwater green algae, cysts of dinoflagellates and initial data of diatom analysis of Lake Ladoga sediments are presented in the paper. The accumulation of the studied deposits occurred in the late Mikulino interglacial (Eemian), the Late Glacial and Holocene.

*Keywords:* Lake Ladoga, bottom sediments, pollen and spores, cysts of dinoflagellates, freshwater green algae, diatoms, Mikulino (Eemian) interglacial, Late Glacial, Holocene

## СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ВОДЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Мария Владимировна Сакирко,  
к.г.н., научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук  
E-mail: [sakira@lin.irk.ru](mailto:sakira@lin.irk.ru)

Валентина Михайловна Домышева,  
к.г.н., старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук  
E-mail: [hydrochem@lin.irk.ru](mailto:hydrochem@lin.irk.ru)

Тамара Викторовна Ходжер,  
д.г.н., профессор  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук  
E-mail: [khodzher@lin.irk.ru](mailto:khodzher@lin.irk.ru)

*Аннотация:* На основании большого массива данных и результатов предыдущих исследований установлена стабильность ионного состава воды открытых участков озера на всех его глубинах при выраженных сезонных изменениях, вертикальной стратификации и широтных различиях в динамике концентраций биогенных элементов. Показано, что динамика концентраций кислорода и биогенных элементов в трех котловинах озера за 2013-2015 гг. зависит от продуктивности фитопланктона и находится в пределах многолетних колебаний.

*Ключевые слова:* озеро Байкал, биогенные элементы, кислород, ионный состав

Озеро Байкал по своей площади, глубине, объему чистой воды и биологическому разнообразию не имеет аналогов в мире, и, соответственно, требует комплексного, изучения как поступления химических веществ в озеро, так и распределения их во времени и пространстве в его водной толще. В работе использованы данные исследований химического состава воды Байкала на 20 станциях в пелагиали в 2013 (май-июнь, август, октябрь), 2014 г. (май-июнь, август) и 2015 г. (июнь, август). Химический анализ воды выполнен в фильтрованных (0,45 мкм) пробах. Определение минерального фосфора проведено фотометрическим методом, общий фосфор определялся этим же методом с предварительным сжиганием с персульфатом калия [1]. Содержание нитратов определялось фотометрически с использованием салициловокислого натрия [2].

Основными особенностями химического состава байкальских вод являются постоянство содержания главных ионов, высокое насыщение воды кислородом, а также низкая концентрация биогенных элементов и органического вещества.

Суммарная концентрация растворенных солей в воде Байкала составляет около 96 мг/л, преобладающими ионами являются гидрокарбонаты и кальций (табл.1). Еще в середине прошлого столетия К.К. Вотинцев [3] указывал на постоянство концентрации главных ионов по акватории, по глубине и по сезонам года. Это подтверждается и более поздними исследованиями Байкала с применением таких методов анализа, как ионная хроматография, пламенная и атомно-абсорбционная спектрофотометрия [4-6]. Постоянство концентрации главных ионов объясняется

огромным объемом байкальской воды, который значительно больше (около 400 раз), чем годовой сток рек, и относительно быстрым вертикальным перемешиванием водных масс (10-30 лет) [7-11].

Таблица 1

Средняя концентрация компонентов ионного состава воды оз. Байкал и среднеквадратичное отклонение по массиву данных 1200 проб

Компонент	Концентрация, мг/л
$\text{HCO}_3^-$	66,4±1,64
$\text{SO}_4^{2-}$	5,20±0,13
Cl	0,43±0,03
$\text{Ca}^{2+}$	16,4±0,39
$\text{Mg}^{2+}$	3,03±0,07
$\text{Na}^+$	3,34±0,11
$\text{K}^+$	1,01±0,06

Изменения содержания главных ионов в воде Байкала отмечается локально – вблизи наиболее крупных притоков озера, где концентрация главных ионов в водах рек может быть выше (р. Селенга, р. Баргузин и др.) или ниже их значений в открытом озере (реки северной оконечности, реки Хамар-Дабана)

Содержание растворенного кислорода изменяется в среднем от 9,5 до 14,5 мг  $\text{O}_2$ /л. В Байкале, в отличие от большинства малых озер, пик продуктивности фитопланктона приходится на подледный период, второй, уже меньший пик в развитии водорослей отмечается летом [12-15]. Насыщение воды кислородом в периоды интенсивного развития фитопланктона в фотической зоне может достигать 110-115 %, а в придонной области не опускается ниже 70%. Основными факторами, определяющими динамику кислорода, являются жизнедеятельность фитопланктона, круговорот органического вещества и температурный режим. Содержание  $\text{O}_2$  максимально у поверхности и снижается с глубиной (рис. 1). В летний и ранний осенний периоды максимум концентрации может быть смещен в более глубокие слои (до 25-50 м), что связано как с угнетением водорослей солнечной радиацией [12], так и выделением его в атмосферу при прогреве поверхностной воды.

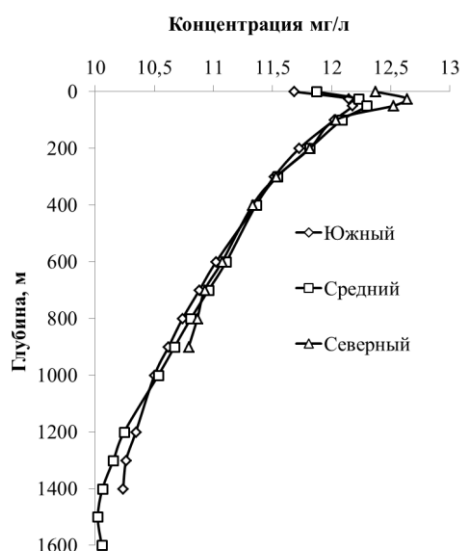


Рис. 1. Вертикальное распределение средней концентрации кислорода, 2013-2015 г.

Сезонные изменения содержания кислорода отмечаются лишь в верхнем 100-200-метровом слое воды. Для сезонной динамики кислорода характерны два максимума. Зимний (до 14,5 мг  $\text{O}_2$ /л) приурочен к периоду интенсивного подледного развития водорослей в марте-апреле. Летний максимум (по насыщению) (август-начало сентября) обычно меньше по величине. В периоды

осенней и весенней гомотермии концентрация кислорода однородна во всем 100-метровом слое. Глубже 200-300 м сезонные изменения концентрации кислорода отсутствуют, содержание его практически равномерно убывает с глубиной. В придонной зоне весной и осенью усиливаются механизмы водообмена, обеспечивающие поступление в придонные слои вод из верхних горизонтов, обогащенных кислородом.

Характер вертикального распределения кислорода во всех котловинах Байкала одинаков, что обусловлено общими для всего озера биологическими процессами и идентичностью основных механизмов водообмена [8,9]. Влияние гидродинамических факторов может приводить к некоторой неоднородности пространственного распределения концентрации кислорода, но различия их невелики.

Вертикальное распределение фосфора как минерального, так и общего для разных месяцев схожее. Содержание минерального и общего фосфора увеличивается с глубиной и в придонной области составляет 14-16 мкг/л. Различия наблюдаются только в верхнем 100-метровом слое воды, иногда распространяясь на большие глубины, что обусловлено сезонными изменениями интенсивности продукционно-деструкционных процессов. Максимальный рост концентрации минерального фосфора отмечается в слое температурного скачка, располагавшегося на различной глубине (рис. 2). Глубже 200-300 м концентрация минерального и общего, как и содержание кислорода, практически не изменяется по сезонам. Максимальная доля органического фосфора наблюдается в 25-метровом слое, причем в разные сезоны доля его в общем содержании различна: в июне, в период затухания развития подледного комплекса водорослей его доля составляет 17%, в июле в начале развития летнего комплекса водорослей - 44%, в августе в период максимума развития летнего комплекса водорослей - 63%, в октябре период затухания развития летнего комплекса водорослей - 35 %). Влияние донных отложений обуславливает незначительный рост его доли в придонной области (не более 3%).

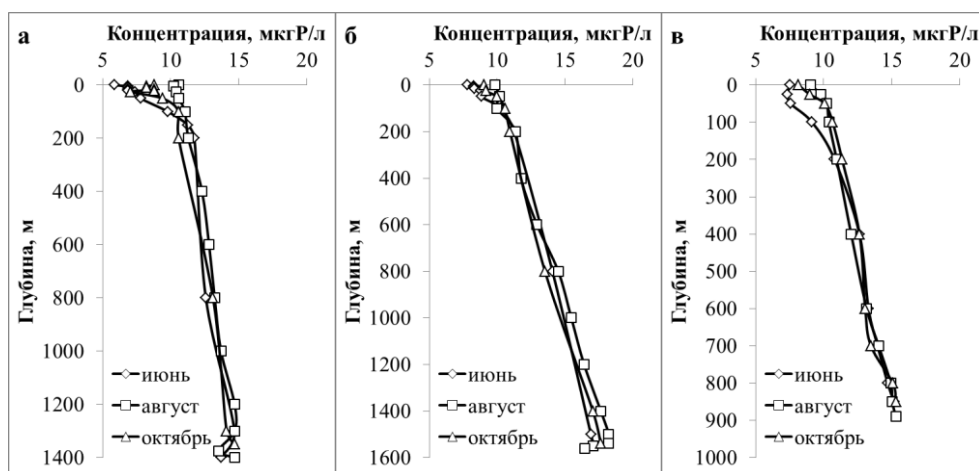


Рис. 2. Вертикальное распределение средней концентрации минерального фосфора в воде южной (а), средней (б) и северной (в) котловинах Байкала в 2013 г.

Сезонная динамика и вертикальное распределение концентрации нитратов аналогичны таковой минерального фосфора. Концентрация нитратов в придонных водах озера достигает 0,7 мг  $\text{NO}_3^-/\text{л}$  (рис. 3). Следует отметить, что из всех форм минерального азота в воде глубоководной части Байкала присутствует в основном нитратный азот. Аммонийный и нитритный азот в небольших количествах отмечен только в верхних слоях воды, главным образом, в конце периода вегетации водорослей, и в придонных горизонтах. В литорали озера аммонийный и нитритный азот присутствует практически всегда, но содержание этих форм азота незначительно.

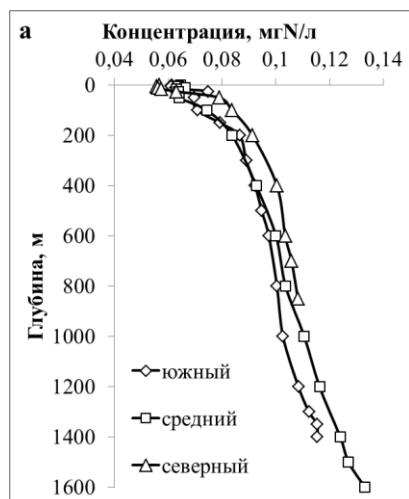


Рис. 3. Вертикальное распределение средней концентрации нитратного азота в воде Байкала, 2013-2015 г.

В разных котловинах озера на одинаковых глубинах содержание фосфатов и нитратов имеет некоторые различия. Эти различия связаны не с величиной внешнего поступления биогенных элементов в каждую из котловин (с притоками и атмосферными осадками при водообмене между котловинами [16], а с интенсивностью развития фитопланктона. Так внешнее поступление биогенных элементов на единицу площади или объема возрастает от Южного к Северному Байкалу. В том же направлении, согласно данным Г.И. Поповской [17], снижается интенсивность развития фитопланктона, при этом среднее содержание биогенных элементов в Северном Байкале, как видно из рисунка 3, выше, чем в других котловинах озера.

Сравнительный анализ данных 2013-2015 гг. с таковыми предыдущих лет не показал значимых различий в содержании этих элементов в глубинной области Байкала. По содержанию растворенного кислорода и биогенных элементов воды пелагиали благоприятны для жизни гидробионтов.

При общем стабильном естественном состоянии, основной угрозой для экосистемы озера остаются проблемы локального загрязнения прибрежных вод акватории биогенными элементами, органическим веществом, поступающими с притоками, а также от населенных пунктов, туристических комплексов, расположенных на берегу озера, и кораблей. Работы, проводимые в режиме мониторинга по исследованию химического состава пелагиали вод Байкала, с использованием современного аналитического оборудования и высокоточных методов анализа крайне важны и будут продолжены в целях разработки стратегии защиты озера от загрязнения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН №0345-2014-0007 №гос. рег. 01201353446 и частичной поддержке гранта РФФИ 14-05-00277-а.

#### Литература:

1. Wetzel R. G., G. E. Likens Limnological analyses // New York.: Springer-Verlag. - 1991. - 391 p.
2. ГОСТ 33045-2014 Вода. Методы определения азотсодержащих веществ
3. Вотинцев К. К. Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1961а. – 310 с.
4. Falkner K. K., Measures C. I., Herbelin S. E., Edmond J. M., Weiss R. F. Major and minor element geochemistry of Lake Baikal //Limnol. Oceanogr. –1991.- Vol. 36(3).- p.413-423.
5. Грачев М. А., Домышева В. М., Ходжер Т. В., Коровякова Н. В., Голобокова Л. П., Погодаева Т. В., Верещагин А. Л., Гранин Н. Г., Гнатовский Р. Ю., Косторнова Т.Я. Глубинная вода озера Байкал - природный стандарт пресной воды. // Химия в интересах устойчивого развития, 2004.- №12.- с. 417-429.
6. Домышева В. М., Ходжер Т. В. Гидрохимия Байкала. Химический баланс озера. // Байкаловедение, книга 1, Новосибирск, Наука, 2012, с. 206-228

7. Weiss R. F., E. C. Carmack, and V. M. Koropalov. 1991. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal. *Nature* 349: 665- 669
8. Hohmann R., M. Hofer, R. Kipfer, F. Peeters, D. M. Imboden, H. Baur, and M. N. Shimaraev. 1998. Distribution of helium and tritium in Lake Baikal. *J. Geophys. Res.* 103:12823-12838.
9. Kodenev G. G., M. N. Shimaraev, and A. T. Shishmarev. 1998. Determination of terms of renewal of Baikal deep waters with chemical tracers. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39: 842–850.
10. Ravens T. M., Kocsis O., Wüest A. and Granin N. Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal // *Limnology and Oceanography*. — 2000. — Vol. 45. — P. 159–173.
11. Kipfer R., Hofer F., Peeters D. M. Vertical turbulent diffusion and upwelling in Lake Baikal estimated by inverse modeling of transient tracers // *Journ. Geophys. Res.-Oceans*. — 2000. — Vol. 105. —P. 3451–3464.
12. Поповская Г. И. Годовые изменения фитопланктона. // *Тр./ АН СССР. СО. Лимнол. ин-т; 1971; Т.12(32): Лимнология придельтовых пространств Байкала: С.158-169.*
13. Помазкина Г. В., Белых О. И., Домышева В. М., Сакирко М. В., Гнатовский Р. Ю. Структура и динамика фитопланктона в Южном Байкале (Россия). // *Альгология; 2010; Т.20(1): С.56-72.*
14. Н. А. Бондаренко, О. И. Белых, Н. Ф. Логачёва, И. В. Тихонова, Е. А. Волкова Микроводоросли прибрежной зоны озера Байкал Серия «Биология. Экология» 2012. Т. 5, № 3. С. 88–102.
15. Бондаренко Н. А., Гусельникова Н. Е. Продукция фитопланктона Южного Байкала // *Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. - 1989. - Вып. 1. - С. 77-80.*
16. Шимараев М. Н., Гранин Н. Г., Домышева В. М., Жданов А. А., Голобокова Л. П., Гнатовский Р. Ю., Цехановский В. В., Блинов В. В. О межкотловинном водообмене в Байкале. // *Вод. ресурсы; 2003; 30(6):678-681.*
17. Поповская Г. И. Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения (1958-1990 гг.). Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук в форме научного доклада. - Новосибирск, 1991.- 32 с.

#### **MODERN DATA ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER OF LAKE BAIKAL**

Maria V. Sakirko,  
 PhD, scientific fellow  
 Limnological Institute  
 Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
 E-mail: [sakira@lin.irk.ru](mailto:sakira@lin.irk.ru)  
 Valentina Domysheva,  
 PhD, Senior scientific fellow  
 Limnological Institute  
 Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
 E-mail: [hydrochem@lin.irk.ru](mailto:hydrochem@lin.irk.ru)  
 Tamara V. Khodzher,  
 Doctor of Sciences, Professor  
 Limnological Institute  
 Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
 E-mail: [khodzher@lin.irk.ru](mailto:khodzher@lin.irk.ru)

*Abstract:* On the basis of a large data set and the results of previous studies established the stability of the ionic composition of the water exposed areas of the lake at all depths, with marked seasonal changes in vertical stratification and latitudinal differences in the dynamics of the concentrations of biogenic elements. It is shown that the dynamics of the concentrations of oxygen and nutrients in the three lake basins for the period 2013–2015, depends on the productivity of phytoplankton and is located within the long-term fluctuations.

*Key words:* Lake Baikal, nutrients, oxygen, ionic composition

## ПРОБЛЕМЫ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Татьяна Валентиновна Сапелко,  
к.г.н., старший научный сотрудник ИНОЗ РАН  
E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Аннотация:* Представлен краткий обзор изучения донных отложений Ладожского озера с помощью палинологии, а также новые результаты изучения колонки донных отложений в северной части озера. Определен перечень задач, которые могут быть решены помощью палинологических исследований изучения истории развития Ладоги.

*Ключевые слова:* палеолимнология, палинология, Ладожское озеро, хронология, позднеледниковье, голоцен, скорость осадконакопления

Основная проблема интерпретации результатов изучения донных отложений заключается в существенной разнице скорости осадконакопления в разных частях озера. В основном скорость седиментации в Ладожском озере, как в любом крупном водоеме, весьма низкая, однако, есть и участки, где скорость осадконакопления выше. Это связано со сложным расчлененным рельефом дна озера. В связи с этим нельзя подходить к оценке возраста донных отложений в разных частях озера одинаково. Хронологическая характеристика осложняется также из-за недостатка материала для датирования радиометрическими методами. Содержание органического вещества для датирования с помощью радиоуглеродного анализа, как правило, в осадках Ладоги весьма низкое и не превышает 16% [18]. Для современной котловины Ладожского озера известны лишь две радиоуглеродные датировки  $7310 \pm 1230$  л. н. (ЛУ-3042) для диаграммы колонки донных отложений 911, отобранной во внутреннем плесе Валаамского архипелага и  $15620 \pm 50$  (ЛУ-2815) из колонки донных отложений 1190, отобранной в юго-восточной части озера [5,27].

Палеолимнологические исследования на Ладожском озере проводятся с 1950-х годов [15]. Многолетние исследования с использованием литологического, гранулометрического, геохимического, спектрального, рентгеноструктурного, палинологического, диатомового анализов позволяют получить данные об истории развития озера. Мощность слоев донных отложений изучается с помощью геоакустического зондирования и сейсмоакустического профилирования [3;8;4;17;27 и др.]. По этим данным установлена мощность четвертичных отложений, которая в северной части озера составляет около 60 - 70 м и в южной части - 10 - 15 м [18;27].

Палинологический метод начал применяться с самого начала изучения донных отложений Ладоги и всегда являлся основным в комплексных палеолимнологических исследованиях [1;2]. Изучение длинных и коротких колонок, а также поверхностных проб донных отложений Ладожского озера, с помощью палинологического анализа в разные годы проводились С.А. Абрамовой (1960-70-е годы), Г.М. Левковской (конец 1960-х годов) И.В. Делюсиной (1980-90-е годы), В.И. Хомутовой (1990-е годы), Т.В. Сапелко (1990- 2000-е годы), Л.А. Савельевой и А.А. Андреевым (с 2013 года). Колонки донных отложений отбирались мощностью от нескольких сантиметров до 4,5 м в зависимости от возможностей отбора. Технические возможности отбора донных отложений является еще одной проблемой для изучения больших озер. В связи с большими глубинами и сложными погодными условиями полевые работы на Ладожском озере проводить довольно сложно. До 2013 года отбор кернов донных отложений в основном проводился в летний период с помощью трубок разной модификации ударного типа с корабля. В 2013 году в рамках международного российско-немецкого проекта PLOT осуществлено глубоководное бурение со специально разработанной для бурения больших глубоководных озер устойчивой платформы [22]. Впервые новое современное дорогостоящее оборудование позволило осуществить отбор непрерывной колонки мощностью более 20м. Однако, несмотря на возможности современных методов в рамках международного сотрудничества, основным



методом исследования донных отложений Ладожского озера и здесь стал палинологический. Возраст отобранных кернов и условия формирования отложений определялись с помощью спорово-пыльцевого анализа. Соответственно скорость осадконакопления также можно рассчитывать исходя из этих данных для каждого из изученных кернов.

По имеющимся подтвержденным на сегодняшний день данным изучения колонок донных отложений в разных частях озера установлено некоторое соответствие накопления того или иного типа отложений соответствующему климатическому периоду. Слоистые ленточные или однородные минеральные глины накапливались в аллереде и позднем дриасе, гомогенные глины в пребореале и бореале, илы начали формироваться в атлантический период и продолжали накапливаться в суббореале и субатлантике [20]. Однако более подробное деление по литологическому составу является крайне затруднительным. Для определения относительного возраста донных отложений Ладожского озера предпринималась попытка использования палеомагнитного метода [6]. Полученная кривая изменения магнитного склонения позволила определить относительный возраст нескольких стратиграфических рубежей в колонках донных отложений 901 и 905 в заливе Лехмалахти на северо-западе Ладожского озера [7] и колонке 405 из глубоководной впадины (225м) на севере озера [16]. Во всех изученных колонках на границе позднеледниковых ленточных глин и голоценовых отложений наблюдалось увеличение в 5-7 раз остаточной намагниченности. Для колонки 905 возрастные периоды, которые были определены по палеомагнитным данным, сопоставили с результатами спорово-пыльцевого анализа [7]. Корреляция подтвердила сходство полученных хронологических рубежей.

К настоящему времени с помощью спорово-пыльцевого анализа изучено около 50 колонок донных отложений из современной котловины Ладожского озера. Колонки отбирались в разных частях озера с разных глубин. При этом глубина или мощность отложений не соответствует определенному возрасту отложений. Так, например, в северной части озера глины аллереда и позднего дриаса обнаружены в колонке 304 на глубине около 30 м, а в колонке 905 на глубине около 70 м. Мощность вскрытых глин в колонке 304 составила 68 см, в колонках 905 – 65 см, 901 – около 1 м, а 903 – около 2 м [9,23]. При этом в колонке 304 позднеледниковые глины залегают практически у самой поверхности, а в колонках 905, 901 и 903 позднеледниковые глины перекрыты отложениями голоцена. В центральной части озера колонка донных отложений 300, отобранная с глубины 50 м включает в себя отложения позднего дриаса и всех периодов голоцена мощностью 75 см. Отобранная же также в центре Ладожского озера с глубины 72 м колонка 55 мощностью 45 см состоит из отложений только субатлантического периода [12]. Колонка 1190 из юго-восточной части озера с глубины 78 м мощностью 1м 70см отличается мощным перерывом осадконакопления в середине разреза [5]. На позднеледниковых глинах залегают сразу суббореальные, а затем субатлантические илы. Перерыв в осадконакоплении в южной части Ладожского озера подтверждает вывод о том, что южная часть Ладоги на определенных этапах своего развития в голоцене осушалась [10]. Однако, как показал обзор имеющихся палинологических данных, перерывы осадконакопления характерны и для других частей Ладожского озера. Это особенность всех больших озер, так же, как и морей, т.к. для них также характерны течения, волновые процессы, сложный рельеф дна. Соответственно скорость осадконакопления в разных частях озера разная, часты перерывы, размывы, а иногда, как было указано выше, и практически прекращение озерного осадконакопления. Примером может служить упомянутая колонка донных отложений 304, отобранная на севере озера, где получены новые результаты спорово-пыльцевого анализа (рис.1) для позднеледниковых отложений северной части современной котловины Ладожского озера. Полученные данные подтвердили выводы о большой мощности позднеледниковых отложений на севере Ладоги и наличие здесь этих отложений, залегающих у поверхности и не перекрытых сверху другими осадками. В основании колонки залегают тёмно-серые алеврит - пелитовые глины, которые выше переходят в бурые алеврит-пелитовые слабо слоистые глины [20]. Все выделенные палинозоны характеризуют холодные сухие условия позднеледниковья. Низкая концентрация пыльцы в донных отложениях свидетельствует о неблагоприятных условиях для отложения пыльцы. Ладожское озеро в это время представляло собой восточный залив Балтийского Ледникового озера. Водосборный

бассейн водоема превышал современный во много раз. Водосбор покрывала перигляциальная растительность, представляющая собой тундрово-степные сообщества.

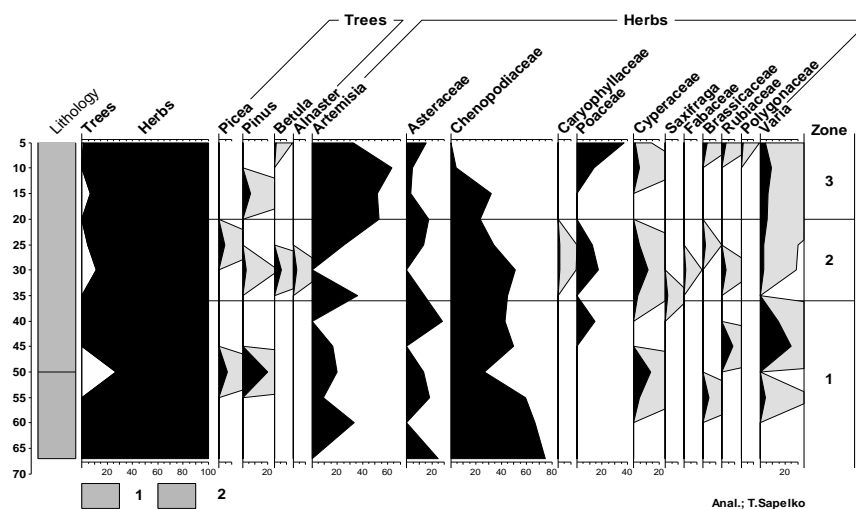


Рис. 1. Спорово-пыльцевая диаграмма колонки донных отложений Ладожского озера (ст. 304). Условные обозначения: 1 - бурые алеврит-пелитовые слабо слоистые глины; 2 - темно-серые алеврит - пелитовые глины.

Незначительное количество пыльцы древесных пород, которое периодически отмечается во всех пыльцевых зонах, очевидно, переносится на север с юга обширного водосбора. Отмечается и переотложение пыльцы. Для разрезов южнотаежной зоны характерно распространение древесных пород, например, ели, в аллереде (так называемый нижний максимум ели). Оттуда, как по воде, так и по воздуху пыльца древесных пород могла переноситься по всему водоему. А потому палинозоны 1 и 3, несмотря на наличие пыльцы древесных пород, можно отнести к холодным этапам позднеледникового – позднему дриасу и среднему дриасу соответственно. Палинозона 2 немного отличается от других зон. Увеличение общей концентрации пыльцы, а также рост содержания и разнообразия пыльцы древесных пород свидетельствует об улучшении условий для развития растительного покрова и потеплении климата. Очевидно, что в этот период происходило увеличение заноса пыльцы древесных пород, которые в это время распространялись в южной части водосбора. В связи с этим палинозону 2 можно отнести к аллереде. Постепенно снизу вверх по разрезу происходят и изменения в травянистом покрове. Если в среднем дриасе и аллереде преобладали маревые, то в позднем дриасе основную роль в развитии растительного покрова стали играть полыни. Отдельно от колонки в той же точке была отобрана поверхностная проба. Результаты анализа поверхностной пробы отражают современное состояние растительного покрова северного побережья Ладожского озера. Преобладает пыльца древесных пород, среди которых доминирует пыльца сосны. Среди спор отмечены *Polypodiaceae*, *Sphagnum*. Содержание пыльцы трав незначительно. Другие ранее изученные поверхностные пробы северной части Ладожского озера также показывают спектры с большим содержанием пыльцы древесных пород, основную роль в которых играет пыльца *Pinus* [25]. В связи с этим можно подтвердить полученные по изучению колонки 304 данные, что верхний образец колонки (верхние 5 см) не соответствует современным отложениям. Это еще раз подтверждает низкую скорость седиментации и отсутствие осадконакопления в голоцене в изученном районе Ладожского озера.

Ранее мощные слои позднеледниковых отложений с помощью спорово-пыльцевого анализа были изучены в основном для шхерных районов Ладоги. Изученная толща мощных позднеледниковых осадков колонки 304 исследована для района «открытой Ладоги». Сравнивая полученные результаты можно отметить в изученной толще низкую концентрацию пыльцы, более

бедный осредненный состав пыльцы, полное отсутствие спор, более низкий процент содержания пыльцы древесных пород, чем для разрезов шхерной зоны. Если посмотреть на схематическую реконструкцию Балтийского Ледникового озера (рис.2) даже на момент его спуска [24;21] можно предположить районы поступления пыльцы в озеро и сделать вывод о том, что этих районов было в позднеледниковье гораздо больше, чем в настоящее время.

В результате можно отметить, что палинологические исследования играют важнейшую роль в изучении истории развития Ладожского озера. С помощью палинологии мы можем решать следующие задачи:

- Реконструкция растительности на зональном уровне
- Реконструкция климата на зональном уровне
- Хронология периодов развития Ладожского озера
- Фиксация перерывов осадконакопления
- Определение скорости осадконакопления
- Фиксация антропогенного воздействия
- Косвенные данные по снижению уровня озера



Рис.2. Реконструкция Балтийского Ледникового озера перед прорывом [24](Donner, 1982).

С целью решения проблем палеолимнологических исследований больших озер историю Ладожского озера изучают по малым озерам водосборного бассейна Ладоги, которые на том или ином этапе своего развития были частью Ладожского озера [11;14;19;26,13]. Изучая донные отложения подобных озер, мы можем сопоставить палинозоны, полученные для современной котловины Ладожского озера и палинозоны, выделенные для ладожских отложений в малых озерах. При изоляции малого озера в целом увеличивается скорость осадконакопления, а также начинается интенсивное накопление органического вещества, что дает возможность подтверждения хронологии выделенных палинозон с помощью радиоуглеродного датирования.

Изученные разрезы малых озер, а также выше приведенная корреляция палинологических результатов центральной и шхерной зон северной Ладоги свидетельствуют о том, что в береговой зоне Ладожского озера скорость осадконакопления, накопление органического вещества и захоронение пыльцевых зерен выше, чем в «открытой Ладоге». В связи с этим у нас есть возможность корреляции палинозон малых озер, содержащие Ладожские отложения; палинозон шхерной зоны Ладожского озера и палинозон любой другой точки Ладоги, что позволит датировать донные отложения даже такого большого озера, как Ладожское.

#### Литература:

1. Абрамова С. А. Результаты спорово-пыльцевого анализа донных отложений Ладожского озера / Материалы к симпозиуму по истории озер Северо-запада / Под. ред. С.В. Калесника. Л., 1965. с. 108-131.
2. Абрамова С. А., Давыдова Н. Н., Квасов Д. Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-Запада. Л., 1967, с.113-132.
3. Амантов А. В. Этапы геологического развития Ладожского озера. – Эволюция природной обстановки и современного состояния геосистемы Ладожского озера. СПб, изд. РГО, 1993, с. 5-13.
4. Амантов А. В., Спиридонов М. А. Геология Ладожского озера. – Сов. Геология, 1989, № 4, с. 81-86.
5. Арсланов Х. А., Гей Н. А., Давыдова Н. Н., Джиноридзе Р. Н., Кошечкин Б. И., Пушенко М. Я., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера. Известия РГО, т. 128, вып.2, 1996, стр.12-21.
6. Бахмутов В. Г. Датирование донных отложений с помощью палеомагнитного метода //История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. СПб, Наука. 1990, с. 42-46.
7. Бахмутов В. Г., Давыдова Н. Н., Делюсина И. В., Рыбалко А. Е., Субетто Д. А. История развития зал. Лехмалахти в поздне- и послеледниковье// Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. Н.Н. Давыдова, Б.И. Кошечкин (ред.). СПб. Российская Академия Наук. РГО, 1993, с. 43-48.
8. Давыдова Н. Н., Субетто Д. А. Особенности процессов осадконакопления в Ладожском озере // Методы исследования озерных отложений в палеоэкологических и палеоклиматических аспектах. Вильнюс, 1986. С.80-82.
9. Давыдова Н. Н., Делюсина И. В., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене – голоцене. – Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. Н. Н. Давыдова, Б. И. Кошечкин (ред.). СПб. Российская Академия Наук. РГО, 1993, с. 14-24.
10. Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л., 1975, 278 с.
11. Клейменова Г. И., Севастьянов Д. В. Роль комплексного палеогеографического анализа для реконструкции особенностей эволюции озер и ландшафтов Северо-западного Приладожья в голоцене // Вестник СПбГУ, сер. 7, 1995, вып. 3, с. 68-79.
12. Сапелко Т. В., Игнатьева Н. В., Кузнецов Д. Д. Антропогенные и природные факторы развития Ладожского озера в позднем голоцене по данным комплексного анализа донных отложений // Сохраним природное и культурное наследие Ладожского озера. Сборник научных трудов. СПб. 2011. С.170-181.
13. Сапелко Т. В. Особенности палинологических реконструкций больших и малых озер в позднем плейстоцене- голоцене // Проблемы современной палинологии Материалы XIII Российской палинологической конференции, Сыктывкар, 2011 г., с.191-193.
14. Севастьянов Д. В., Субетто Д. А., Арсланов Х. А., Денисенков В. П., Чернова Г. М. Процессы седиментации в озерно-болотных геосистемах Северо-Западного Приладожья // СПб. Изв. РГО. Т. 128, вып. 5, 1996, с. 36-47
15. Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. Л., 1966. 124 с.
16. Субетто Д. А. Литологические особенности донных отложений Ладожского озера по результатам исследований длинных колонок // Вопросы гидрофизики, гидрохимии и гидробиологии озер. ВИНТИ N5653-B86, Л., 1986, с. 87-92.

17. Субетто Д. А., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А. Общая характеристика донных отложений. // История Ладожского, Онежского и Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л., 1990, с. 37-41.
18. Субетто Д. А., Сергеева Л. В., Крыленкова Н. В. Геохимическая характеристика донных отложений озера. В кн.: «Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее». Дрaбкова В.Г., Румянцев В.А. (ред.). СПб, Наука, 2002. С. 136-147.
19. Субетто Д. А., Севастьянов Д. В., Савельева Л. А., Арсланов Х. А. Донные отложения озер Ленинградской области как летопись Балтийских трансгрессий и регрессий // Вестник СПбГУ. 2002.
20. Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб. Изд. РГПУ им. А.И. Герцена. 2009, 339 с.
21. Andrén T. 2003: Ancylussjön – fortfarande ett mysterium. Havsutskikt 3, 2003, 8-9.
22. Andreev A., Savelieva L., Shumilovskikh L et.al Lake Ladoga's postglacial-glacial-preglacial sediment record: first palynological results from Russian-German project PLOT // Paleolimnology of Northern Eurasia. Abstract of International conference. Petrozavodsk, 2014, p. 29-30.
23. Delusin I. The Holocene pollen stratigraphy of lake Ladoga and the vegetational history of its surroundings. Helsinki. - 1991. - 66 p.
24. Donner J. 1982. Fluctuation in water level of the Baltic Ice Sea // Studies on the Baltic shorelines and sediments indicating relative sea level changes, p.13-28.
25. Sapelko T. V. Pollen spectra of the modern sediments of Lake Ladoga // H.Simola, A. Yu. Terzhevik, M. Viljanen, I. J. Holopainen (eds), Proceedings of the Fourth Int. Lake Ladoga Symp. 2002. Univ. of Joensuu, Publ. of Karelian Inst. 138: 223-227, 2003.
26. Sapelko T., Subetto D., Gerasimov D., Ludikova A., Kuznetsov D., Dolukhanov P. Paleolimnology and Paleoenvironments of Lake Uzlovoye (Lake Ladoga Region, NW Russia) // Man and environment in boreal forest zone: past, present and future. Int. Conference, July 24-29, 2008, Central Forest State Natural Biosphere Reserve, Russia, 2008. p. 85-87
27. Subetto D. A., Davydova N. N., Rybalko A. E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, № 140, 1998, p. 113-119.

#### **PROBLEMS OF PALAEOOLIMNOLOGICAL RESEARCH IN THE LAKE LADOGA: PALYNOLOGICAL ASPECT**

Dr. Tatyana Valentinovna Sapelko,  
senior researcher,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Abstract:* We performed review of the palynology study of Lake Ladoga sediments, as well as new results of the sediments study in the northern part of the lake. We have recorded the objectives of the Lake Ladoga history of solved by palynological studies.

*Keywords:* paleolimnology, palynology, Lake Ladoga, chronology, Late Glacial, Holocene, sedimentation

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СТОКА РЕК В БАССЕЙНАХ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЁМОВ РОССИИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ

Вениамин Александрович Семенов,  
д.г.н., главный научный сотрудник  
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»  
E-mail: semven@meteo.ru

*Аннотация:* В сообщении приводятся результаты оценок изменений максимальных расходов воды и опасных наводнений в весеннее половодье и при паводках, минимальных расходов воды в межень и экстремальных маловодий на реках природно-климатических зон и бассейнов озера Байкал, Каспийского, Чёрного и Азовского морей в пределах территории России при современных изменениях климата.

*Ключевые слова:* максимальные, минимальные расходы воды, опасные наводнения, экстремальные маловодья, изменения климата

В конце XX – начале XXI столетий в экстремальном стоке рек на территории России, в том числе в бассейнах озера Байкал, Каспийского, Черного и Азовского морей, произошли существенные изменения, обусловленные колебаниями климата [1– 6]. Наиболее характерными являются изменения частоты и продолжительности наводнений и экстремальных маловодий, обусловленные изменениями максимального и минимального стока рек, сведения о которых до 2010 года приведены в [1,4,5]. За последнее пятилетие (2011-2015 гг.) суммарное количество опасных гидрологических явлений с учтёнными потерями преимущественно возросло: 2011 г. – 23, 2012 г. – 39, 2013 г. – 69, 2014 г. – 54, 2015 г. – 79.

Суммарное годовое количество наводнений в последнем пятилетии было наибольшим (264), а их высота и суммарная продолжительность на реках Амур (2013 г.), Обь (2014, 2015 гг.), в бассейнах Кубани (2012 г.), Колымы (2014 г.) была наибольшей за периоды инструментальных наблюдений.

Для анализа реакции экстремального стока рек России на изменения климата использованы материалы наблюдений Росгидромета за 30-летие 1985-2014 гг. на реках с наименее нарушенной хозяйственной деятельностью гидрологическим режимом с площадями водосборов, как правило, более 3-5 тыс. км<sup>2</sup> для равнинных и более 1 тыс. км<sup>2</sup> для горных рек. Для сравнимости результатов при оценке изменений стока за периоды половодья использованы суммы среднемесячных величин стока за апрель-май или май-июнь в зависимости от широтного расположения бассейна. Максимальные и минимальные расходы воды определялись по наибольшим и наименьшим за год величинам расходов воды. Низкая межень оценивалась по наименьшей в летне-осенний и зимний периоды года величине месячного стока.

Для выяснения тенденций в изменениях стока произведены испытания рядов на линейный тренд. При пространственном обобщении результаты испытания на тренд объединялись в три группы: увеличение стока (положительный тренд или тенденция с вероятностью более 75 %), уменьшение стока (отрицательный тренд или тенденция с вероятностью более 75%) и отсутствие изменений (вероятность изменения менее 75 %).

Для оценки изменений частоты наводнений и маловодий на реках использованы материалы созданной в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» базы ежегодных сведений об опасных гидрометеорологических явлениях с документально подтвержденным ущербом за 1991–2015 гг.

### **Изменения максимальных расходов и опасных наводнений.**

Результаты трендового анализа изменений экстремальных величин стока свидетельствуют о том, что последствия изменений климата не однозначно сказались на изменениях стока половодья, максимальных расходов воды и на частоте опасных наводнений в разных климатических поясах и регионах. Исследования широтных различий в изменениях стока на всей территории России

показали, что на реках европейской части территории страны преобладало отсутствие значимых изменений стока половодья и максимальных расходов воды или его уменьшение. На реках азиатской части территории, наоборот, преобладало увеличение стока воды в период половодья и максимальных расходов воды, но направленность их изменения существенно меняется в зависимости от широтного и орографического положения бассейна. В стоке рек Северо-Востока страны на территории Субарктического и Умеренного поясов (реки Алдан, Амга, Олёкма в бассейне Лены), Колыма, Яна изменения максимального стока с тенденцией увеличения, а на р. Индигирка (Субполярный пояс) и Вилюй (юг Умеренного пояса) изменения слабо отрицательные. На реках Сибири, в Субарктическом и Субполярном поясах и средних широтах Умеренного пояса, в период 1985–2010 гг. в изменениях стока весеннего половодья и максимальных расходов преобладали положительные тенденции, а в южных, равнинных районах преобладало их уменьшение.

Такое распределение направленности изменений стока половодья и максимальных расходов воды определяется, прежде всего, изменениями количества сезонных осадков. Для зимнего периода этого 30-летия характерно увеличение на большей, азиатской части территории страны количества зимних осадков и запасов воды в снежном покрове к началу снеготаяния. Уменьшение снеготаяния, особенно на залесённых территориях, отмечено в северных, южных и западных районах ЕТР, где зимние оттепели и увеличение продолжительности снеготаяния не способствовали формированию высоких максимумов весеннего половодья. Увеличение количества зимних осадков на ЕТР наблюдалось на Северном Кавказе и на Урале. Увеличение количества весенних осадков было характерно для Дальнего Востока, горных районов юга Сибири, Кавказа.

В бассейне оз. Байкал преобладание с 90-х годов фазы низких количеств атмосферных осадков обусловило отрицательные изменения максимального стока р.Селенги и других рек бассейна. Опасные наводнения, обусловленные преимущественно локальными дождевыми паводками, характерны для горных районов. Наибольшая частота их отмечалась в бассейне р. Джиды, формирующей сток в горах Хамар-Дабан.

Максимальный сток в бассейне Каспийского моря за рассматриваемый 30-летний период преимущественно уменьшался. Тенденции увеличения наблюдались на некоторых реках Кавказской части территории бассейна (рр. Терек, Теберда, Кума), в бассейне Верхней Оки и Волги (рр. Угра, Протва, Волга - пост Старица). В бассейнах рек Камы и Урала наибольшую опасность представляли дождевые паводки, повторяемость которых в горных районах России особенно возросла с 2001 года. Для равнинных районов бассейна было характерно увеличение частоты высоких дождевых паводков на малых реках при выпадении кратковременных ливневых осадков, которые обусловили сложности по сбросам ливневых вод коммунальным и дорожным службам многих городов.

Трендовый анализ максимальных расходов воды рек Азово-Черноморского бассейна выполнен по данным наблюдений на реках бассейнов Дон, Днепр и Десна (на территории России), Кубань, её притоках и малых реках, впадающих непосредственно в море. Максимальный сток большинства рек бассейна р. Дон за 30-летний период характеризуется отрицательными тенденциями (рр. Валуй, Девица, Тихая Сосна, Подгорная, Хопер), а максимальный сток рек Медведица и Терса – отсутствием изменений. Отрицательные изменения максимального стока характерны и для малых рек бассейна Азовского моря (рр. Вулан, Миус). В изменениях максимального стока Верхнего Днепра (с. Болшево) и его притоков (Десна, Болва, Сейм, Тускарь) тоже преобладали отрицательные тенденции.

На реках Кавказа, в бассейне р. Кубань, преобладало отсутствие изменений максимального стока, но в горной части бассейна (рр. Белая, Большой Зеленчук, Фарс) преобладали положительные изменения, а в максимальном стоке небольших рек Западного Кавказа тоже отмечалось увеличение максимальных расходов воды (рр. Мзымта, Туапсе).

На европейской территории России наибольшую опасность наводнений представляют дождевые паводки на горной и предгорной части территории Северного Кавказа и Причерноморья, где связь частоты опасных паводков с опасными (сильными и

продолжительными) осадками наиболее тесная (коэффициент корреляции 0,58). В горных районах при современном потеплении увеличению частоты наводнений способствует возрастание площади одновременного снеготаяния и выпадения опасных дождей одновременно в нескольких высотных поясах, что приводит к увеличению максимального стока и высоты наводнения на больших реках. В бассейнах рек Северного Кавказа в рассматриваемый период происходило также увеличение частоты опасных селевых потоков, а коэффициент корреляции между сильными ливневыми дождями и селями составляет 0,74. Повторяемость катастрофического наводнения локального масштаба, вызванного ливневыми осадками летом 2012 года на небольшой реке Адагум в бассейне р. Кубань с человеческими жертвами в г. Крымске оценивается не чаще чем один раз в 200 лет [1].

Сравнительный анализ изменений частоты опасных дождей и наводнений показал, что значительное увеличение опасных наводнений в половодье на реках территории России наблюдалось в 2001-2005 гг. с некоторым уменьшением в 2006-2010 гг., а с 2011 г. возобновился рост их количества, и наибольшее увеличение произошло в 2013 году. Это свидетельствует об увеличении дождевой составляющей в формировании экстремальных расходов воды не только паводков, но и половодий [4].

В субарктических районах и средних широтах азиатской территории, северных широтах европейской территории, частота опасных наводнений возрастает также от ледовых заторов, что обуславливает увеличение частоты опасных наводнений и при отсутствии роста максимальных расходов воды рек.

#### **Изменения минимального стока воды и экстремальных маловодий на реках.**

Результаты трендового анализа показали, что направленность изменения месячного минимального стока за периоды летне-осенней межени и минимального суточного стока зависит от широтного положения бассейна реки и региона. В северных и средних широтах азиатской части территории страны в изменениях летне-осенней межени и минимальных расходах наблюдалось увеличение стока, а почти на всей европейской территории, кроме высокогорных рек Северного Кавказа и рек Кольского полуострова, преобладали отрицательные тенденции. На реках азиатской территории уменьшение минимального летнего стока было на реках южных районов Сибири и Дальнего Востока.

На реках бассейна озера Байкал в изменениях минимального стока в летний и в зимний периоды преобладало его уменьшение, а продолжительность экстремальных маловодий рек Забайкалья возрастала. Наибольшее увеличение продолжительности летних экстремальных маловодий характерно для юго-восточных районов бассейна озера Байкал. В периоды зимней межени отмечено тоже преобладание увеличения её продолжительности, особенно в западной части бассейна.

В изменениях минимального стока за зимний период на реках других азиатских территорий преобладало увеличение минимального стока, обусловленное потеплением климата. Наблюдавшееся в конце XX столетия на реках европейской территории России увеличение зимнего меженного и минимального стока, обусловленное возрастанием доли подземного питания рек [6], в первом десятилетии XXI века сохранилось или сменилось преобладанием отсутствия его изменений.

В изменениях минимальных расходов воды летне-осенней межени Каспийского и Азово-Черноморского бассейнов увеличение стока с начала XXI столетия сменилось уменьшением, следствием которого явилось увеличение экстремальных маловодий на реках территории Южного федерального округа, Поволжья, Предуралья, что объясняется возрастанием доли дождевой составляющей в стоке рек и сменой атмосферной циркуляции [4, 5].

За 20-летний период (1991-2010 гг.) на реках России подразделениями Росгидромета было зафиксировано 112 экстремальных маловодий с учтённым ущербом, из них в период 1991-1995 гг. – 8, 1996-2000 гг. – 9, 2001-2005 гг. – 51, а за 2006-2010 гг. – 44. Маловодья бывают преимущественно в южной части азиатской территории (юг Западной Сибири, Забайкалье, бассейн р. Амур), но в последние годы бывают также на средних широтах Сибири и Дальнего Востока. Наметилась тенденция увеличения частоты маловодий в первом-втором десятилетиях



XXI века и на реках некоторых районов европейской территории России. Наибольшее увеличение маловодий произошло на реках равнинных территорий Южного Федерального округа и Поволжья (Адыгея, Астраханская, Самарская, Саратовская области). В 2010 году продолжительное маловодье было также на реках Предуралья (Удмуртия, Татарстан, Кировская область), бассейна р. Дон. Рост их частоты объясняется увеличением континентальности климата, выражающегося в сезонном перераспределении и уменьшении осадков, возрастании продолжительности бездождевых периодов не только летом, но и весной, а на Дальнем Востоке и осенью.

**Заключение.** Результаты трендового анализа, свидетельствуют, что в конце XX – начале XXI столетий на реках азиатской территории России изменения экстремальных величин стока воды в основном подчинены географо-климатической зональности: максимальные расходы в половодье и минимальные расходы в тёплый период года увеличивались в высоких и средних широтах и уменьшались в южных районах. На равнинных реках европейской территории изменения максимальных расходов воды не существенны, а минимальные расходы в тёплый период года преимущественно уменьшались, особенно в южных районах.

Территориальное и временное распределение опасности наводнений определяется шириной местности, рельефом, атмосферной циркуляцией, ледовыми заторами. Современные тенденции изменений климата способствуют увеличению частоты, как опасных наводнений, так и экстремальных маловодий на большей части территории крупных внутренних водоёмов России. Районами повышенного риска увеличения частоты опасных наводнений, в том числе катастрофических, являются территории переходных зон от равнин к горам, где повышение количества обильных, продолжительных или ливневых осадков приводит к формированию паводков редкой повторяемости, а также селевых потоков.

Частота маловодий с начала XXI столетия увеличивается преимущественно в южных районах, но в последние годы маловодья стали чаще также в средних и даже высоких широтах. Анализ гидрометеорологических основ экстремальных явлений водности рек свидетельствуют, что при прогнозируемом изменении климата следует ожидать расширения географии и увеличения частоты опасных наводнений и маловодий.

#### Литература:

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет. – 2014. – 1008 с.
2. Семенов В. А., Алексеева А. К. Региональные особенности климатических изменений стока рек СССР // Метеорология и гидрология. – 1989. – №9. – С. 91-97.
3. Семенов В. А. География климатообусловленных изменений опасных наводнений на реках России в конце XX – начале XXI столетий // Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», вып.177. – Обнинск: Изд-во «ВНИИГМИ-МЦД». – 2014. – С.160-174.
4. Семенов В. А. Гидролого-климатические основы и география рисков опасных наводнений и маловодий на реках России // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: Сборник научных трудов. Т.2. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2015. – С. 44-50.
5. Семенов В. А., Гниломедов Е. В., Салугашвили Р. С., Голубев В. Н., Фролов Д. М. География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России // Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», вып.179. – Обнинск: Изд-во «ВНИИГМИ-МЦД». – 2015. – С.198-120.
6. Семенов В. А., Семенова И. В. Антропогенные и климатические изменения гидрологического и гидрохимического режимов рек бассейна Верхней Оки // Метеорология и гидрология. – 2003. – №10. – С.76-85.

**CLIMATE-RELATED CHANGES IN EXTREME RIVER RUNOFFS IN THE BASINS OF  
LARGE INLAND WATER BODIES OF RUSSIA IN THE LATE 20<sup>TH</sup> – EARLY 21<sup>ST</sup>  
CENTURIES**

Veniamin Aleksandrovich Semyonov,  
Doctor of Geography, chief research officer  
FSBI “RIHMI-WDC”  
E-mail: semven@meteo.ru

*Abstract:* Changes in maximum water discharges and inundation hazards during spring high-water periods and floods, as well as in minimum water discharges during low-water periods and in extremely low water levels have been assessed for the rivers of Baikal Lake, Caspian Sea, Black Sea and Sea of Azov basins within the Russian area under current climate changes.

*Key words:* maximum water discharges, minimum water discharges, inundation hazards, extremely low water levels, climate change

## СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ: НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ирина Вениаминовна Семенова,  
к.б.н., ведущий научный сотрудник  
ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун»  
E-mail: semenova@rpatyphoon.ru  
Владимир Георгиевич Булгаков,  
к.ф.-м.н, директор ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун»  
Михаил Алексеевич Запечалов,  
к.х.н., заместитель директора  
ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун»  
Маргарита Николаевна Каткова,  
к.б.н., зав. лабораторией ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун»  
Агеева Наталья Викторовна,  
младший научный сотрудник  
ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун»

*Аннотация:* Система экологического мониторинга озера Байкал и БПТ предназначена для получения, хранения, обработки (обобщения, систематизации) информации о состоянии экологической системы озера Байкал, анализа полученной информации в целях своевременного выявления изменений состояния озера Байкал под воздействием антропогенных факторов, оценки и прогноза этих изменений, а также для получения, хранения, обработки информации о компонентах природной среды, через которые формируется антропогенное воздействие на озеро.

*Ключевые слова:* Байкальская природная территория, загрязнение, комплексная система экологического мониторинга

### *Введение*

В настоящее время в России значительное внимание уделяется развитию государственного мониторинга состояния окружающей среды, как необходимой составляющей реализации концепции устойчивого развития на территории Российской Федерации [1-3]. В соответствии с [2] государственный экологический мониторинг (государственный мониторинг окружающей среды) определяется как «комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды».

Данные и информация, получаемые в системе государственного мониторинга, используются, для решения следующих социально и экономически значимых задач:

– *Оценка условий окружающей среды и тенденций ее изменения.* Она необходима для реализации всех последующих целей. Условия и тенденции со временем меняются, поэтому оценка должна проводиться непрерывно. Научное понимание природных циклов и взаимодействия человека с окружающей средой также продолжает развиваться.

– *Поддержка природоохранной политики.* Данные и информация о состоянии окружающей среды играют важную роль на протяжении всего цикла проведения определенной природоохранной политики.

– *Раннее оповещение о возникновении чрезвычайных экологических ситуаций.*

– *Представление информации общественности.* Право общества на получение информации об окружающей среде закреплено в Конституции РФ, законе «Об охране окружающей среды» и в принципе 10 Декларации по окружающей среде и развитию, принятой в Рио-де-Жанейро [4, 5]. Осведомленность общества и его озабоченность

состоянием окружающей среды могут быть главной движущей силой, содействующей охране окружающей среды.

– *Отчетность перед международными форумами.* В качестве сторон различных многосторонних соглашений по окружающей среде страны принимают на себя обязательства, которые могут включать представление данных о соответствующих тенденциях изменения состояния окружающей среды. Кроме того, ряд международных организаций требуют от своих стран-членов регулярного представления данных по окружающей среде.

Перечисленные выше задачи актуальны и для Байкальской природной территории (БПТ), в состав которой в соответствии с ФЗ «Об охране озера Байкал» [6] входят озеро Байкал, водоохранная зона, прилегающая к озеру Байкал, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации особо охраняемые природные территории, прилегающие к озеру Байкал, а также прилегающая к озеру Байкал территория шириной до 200 километров на запад и северо-запад от него.

#### ***Цели и задачи комплексного экологического мониторинга БПТ***

Экологический мониторинг на БПТ осуществляется в рамках Государственного экологического мониторинга уникальной экологической системы озера Байкал - подсистемы государственного экологического мониторинга [2]. Мониторинг уникальной экологической системы озера Байкал включает мониторинг состояния акватории озера и экологических зон БПТ, на которых формируются влияющие на озеро факторы. Создание и обеспечение функционирования наблюдательных сетей и информационных ресурсов в рамках подсистемы Государственный экологический мониторинг уникальной экологической системы озера Байкал осуществляется Росгидрометом.

Комплексный характер создаваемой системы экологического мониторинга озера Байкал и БПТ предполагает, что в рамках этой системы должны проводиться регулярные наблюдения за состоянием и загрязнением основных компонентов природной среды: атмосферного воздуха, атмосферных осадков, поверхностных вод, почвы и растительности приоритетными загрязняющими веществами, как на фоновом, так и на локальном и территориальном уровнях, с тем, чтобы оценивать происходящие в них изменения под воздействием природных и (или) антропогенных факторов и делать прогноз этих изменений.

В отдельные подсистемы мониторинга БПТ выделен мониторинг СОЗ и мониторинг оз. Байкал по биотическим показателям.

#### ***Задачи системы:***

– регулярные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, изменениями состояния окружающей среды;

– хранение, обработка (обобщение, систематизация) информации о состоянии окружающей среды;

– анализ полученной информации в целях своевременного выявления изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и (или) антропогенных факторов, оценка и прогноз этих изменений;

– обеспечение органов государственной власти, органов местного самоуправления, юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, граждан информацией о состоянии окружающей среды.

Для реализации поставленных задач система должна выполнять следующие основные **функции:**

– измерение в автоматическом режиме концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и показателей качества поверхностных вод;

– измерение в автоматическом режиме метеорологических величин;

– отбор проб (в том числе в автоматическом режиме) и определение в полевых и стационарных условиях содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе,

поверхностных водах, атмосферных осадках, почвах, снежном покрове, биоте; оценка и прогноз загрязнения, в том числе и в случаях нештатных ситуаций техногенного и природного характера;

– сбор, хранение, передача и представление информации.

Подсистема государственного экологического мониторинга уникальной экологической системы озера Байкал, как комплексная система мониторинга окружающей среды создается на базе действующей сети наблюдений Росгидромета путем ее модернизации.

***Основные направления технической модернизации государственной сети наблюдений следующие:***

- Установка автоматических станций мониторинга состояния и загрязнения компонентов окружающей среды (воздух, вода);

- Ввод в эксплуатацию мобильных экологических лабораторий для оперативного реагирования на аварии и чрезвычайные ситуации, связанные с загрязнением окружающей среды;

- Оснащение стационарных химико-аналитических лабораторий современным пробоотборным и аналитическим оборудованием;

- Создание сети наблюдений стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ);

- Создание сети наблюдений за ртутью;

- Создание автоматизированных центров сбора, обработки, передачи и представления информации о состоянии и загрязнении окружающей среды.

#### ***Мониторинг природных сред***

Мониторинг экологической системы озера Байкал включает мониторинг состояния и загрязнения атмосферного воздуха Байкальской природной территории, на которых формируются влияющие на озеро факторы. На формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха Байкальской природной территории оказывают влияние выбросы загрязняющих веществ промышленных предприятий и автотранспорта, как на самой территории, так и за ее пределами. Климатические условия Байкальской природной территории не благоприятны для рассеивания примесей в атмосфере, что приводит к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое воздуха.

Важной задачей системы мониторинга является информационное обеспечение краткосрочного прогноза уровней загрязнения атмосферного воздуха городов и населенных пунктов БПТ, мероприятий по регулированию источников выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). В целях обеспечения оперативного контроля содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе БПТ введены в эксплуатацию 22 автоматических станций контроля за загрязнением атмосферного воздуха и 10 мобильных экологических лабораторий, полностью модернизирована государственная наблюдательная сеть в Республике Бурятия.

Комплексный мониторинг состояния окружающей природной среды бассейна озера Байкал Росгидрометом осуществляется с 1969 г., после полного ввода в строй Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). К концу 70-х годов, была сформирована научно-обоснованная и практически апробированная сеть станций, створов, полигонов, позволяющих получать достаточно полную информацию о состоянии поверхностных вод, донных отложений, атмосферных выпадений и гидробионтов бассейна озера Байкал, так и отдельных участков озера наиболее сильно подверженных антропогенному воздействию [7].

Для непрерывного автоматизированного контроля физико-химических параметров воды и ряда гидрохимических показателей целесообразно использовать автоматизированную систему наблюдения, сбора и оперативного представления информации о качестве поверхностных вод. В 2013-2014 годах были введены в эксплуатацию 2 автоматические станции по контролю за загрязнением воды.

#### ***Мониторинг СОЗ***

Особую опасность для экосистемы Байкала представляют стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ), включенные в список Стокгольмской конвенции, а также ртуть, распространение которых в биосфере имеет глобальный характер. Большинство из этих соединений в настоящее время не входит в стандартную программу мониторинга БПТ,

информация об их концентрациях в окружающей среде носит фрагментарный характер, отсутствует выстроенная методология выполнения таких работ.

В рамках реализации мероприятий осуществляется техническое переоснащение новейшим оборудованием аналитических лабораторий ФГБУ «Иркутское УГМС», «Забайкальское УГМС», «НПО «Тайфун». Приобретаются современные приборы и оборудование, лабораторная мебель, ведется ремонт помещений, осуществляется обучение сотрудников.

Основное внимание уделяется приобретению оборудования, необходимого для организации мониторинга СО<sub>3</sub> на территории БПТ – специальных концентрирующих пробоотборников воздушных проб, хромато-масс-спектрометров, газовых и жидкостных хроматографов и др. Все это позволит в кратчайшие сроки выполнить разработку и совершенствование российских методик выполнения измерений для идентификации супертоксиантов СО<sub>3</sub> в окружающей среде методами хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения.

Специалисты НПО «Тайфун» в рамках научно-методического сопровождения работ по мониторингу СО<sub>3</sub> на БПТ в 2013 году провели рекогносцировочные экспедиционные исследования с отбором проб атмосферного воздуха воды, почв, биоты с целью определения уровней загрязнения СО<sub>3</sub> в компонентах окружающей среды.

В 2013 - 2014 гг. организованы пункты постоянного наблюдения атмосферного переноса СО<sub>3</sub> и других загрязняющих веществ в поселках Листвянка, Култук и Танхой. Расположение пунктов отбора проб позволит оценить влияние Иркутского промышленного узла на перенос ряда СО<sub>3</sub> в южную акваторию озера, а также трансграничный перенос из азиатского региона.

#### ***Представление информации о состоянии и загрязнении окружающей среды***

Представление потребителям информации о состоянии и загрязнении окружающей среды Байкальской природной территории в режиме реального времени осуществляется через специализированные сайты Иркутского и Забайкальского УГМС. На сайте представлена оперативная информация от автоматических постов контроля воздуха и воды.

Для каждого поста контроля воздуха определен список показателей, измеряемых в режиме реального времени (до 11 показателей). СО, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S измеряются на всех постах контроля воздуха. Данные обновляются с 20-минутным интервалом. Потребителям доступны автоматически формируемые бюллетени состояния атмосферного воздуха. В них представлена интегральная информация по различным показателям, включающая оценку качества воздуха в течение суток и за неделю, с градацией уровня загрязненности.

Информацию о загрязнении поверхностных вод можно получить в режиме реального времени аналогично с информацией о загрязнении атмосферного воздуха.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант №16-45-400071).

#### **Литература:**

1. Постановление Правительства Российской Федерации «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды» от 6 июня 2013 г. № 477.
2. Федеральный закон Российской Федерации «О внесении изменений в федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21 ноября 2011 г. № 331-ФЗ.
3. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ (ред. от 07.05.2013 г.)
4. Декларация по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 14 июня 1992 г.). Принцип 10.
5. Федеральный закон Российской Федерации «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 25.06.2012).
6. Федеральный закон «Об охране озера Байкал» от 1 мая 1999 г. № 94-ФЗ.
7. Состояние поверхностных вод бассейна озера Байкал по данным гидрохимических, геохимических и гидробиологических наблюдений в 2014 году // Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2014. – Ростов-на-Дону. – 2015. – С. 281-307.

# COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY: SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES AND FIRST RESULTS

Irina Veniaminovna Semenova,  
Ph. D, Leading research scientist  
IPM RPA “Typhoon”  
E-mail: semenova@rpatyphoon.ru  
Vladimir Georgievich Bulgakov,  
Ph. D, Director IPM RPA “Typhoon”  
Michail Alekseevich Zapevalov,  
Ph. D, Deputy Director IPM RPA “Typhoon”  
Margarita Nikolaevna Katkova  
Ph. D, Head of laboratory IPM RPA “Typhoon”  
Natalia Viktorovna Ageeva,  
Junior research scientist  
IPM RPA “Typhoon”

*Abstract:* The purpose of the environmental monitoring system installed at lake Baikal and in the Baikal natural territory is to gather, store, and process (generalize and systematize) information about the state of lake Baikal’s ecosystem, analyze the information gathered for timely detection of changes in the state of lake Baikal due to anthropogenic influences, and evaluate and predict these changes. Additionally, it serves to gather, store, and process information about elements of the environment through which the anthropogenic influence is felt.

*Keywords:* Baikal natural territory, pollution, comprehensive environmental monitoring system

## МАКРОЗООБЕНТОС ПРОФУНДАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Анастасия Ивановна Сидорова,  
к.б.н., научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ИВПС КарНЦ РАН  
E-mail: [bolt-nastya@yandex.ru](mailto:bolt-nastya@yandex.ru)

*Аннотация:* Профундальный район Онежского озера вследствие многоводности и низкой температуры до настоящего времени сохраняет свое изначально олиготрофное состояние и характеризуется низкой биопродуктивностью.

*Ключевые слова:* макрозообентос, Онежское озеро, олигохеты

В конце XVIII столетия были начаты исследования донной фауны Онежского озера [10]. Их история вплоть до середины XX века подробно отражена в работах С. В. Герда [4,5] и Б. М. Александрова [2]. В последующие десятилетия подробно изучались особенности функционирования донных биоценозов профундали открытой части озера и его крупных заливов (Кондопожская губа, Петрозаводская губа, Повенецкий залив), наиболее подверженных антропогенному воздействию. Результаты этих работ изложены в большом количестве публикаций [3;6;8;12;17;22]. В 2000-е годы исследования глубоководной части Онежского озера продолжают.

Характеристика современного состояния донных сообществ Онежского озера основана на результатах обработки 36 проб в 2014 году и 28 проб в 2015 году, отобранных в глубоководных районах озера. Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем автоматическим коробчатым (площадью 0,025 м<sup>2</sup>) на каждой станции по две пробы, промывали через сито №23 и фиксировали 4% формалином. Камеральная обработка включала разбор проб, согласно стандартным методикам сбора и первичной обработки материала [9]. Выбор организмов из грунта проводился с использованием микроскопа стереоскопического МСП-2 вариант 2 в модифицированной камере Богорова, специально изготовленной для разборки бентосных проб под микроскопом. Взвешивание организмов проводили в сыром виде с точностью 0,0001 г. Разобраный и взвешенный материал фиксировался 70% этанолом. Таксономическая идентификация проводилась с использованием определителей [13;14;15;16;24].

Лимническая гетерогенность озера в значительной степени обусловила и распределение его донного населения по акватории. Согласно качественным и количественным характеристикам бентофауны, озеро можно разделить на несколько условных районов: профундаль открытой части, шхерные районы, район крупных губ, подверженных сильному антропогенному влиянию, и литораль с зоофитомом.

Профундаль занимает значительную часть озера. Ее площадь равна приблизительно 905 тыс. га, что составляет 94% от всей акватории. Этот район включает Центральное Онего, открытые части Повенецкого и Заонежского заливов, а также Малое, Большое Онего и некоторые другие районы со значительными глубинами. Профундаль характеризуется минимальным антропогенным воздействием, незначительным влиянием речного стока, большими глубинами, круглогодичной низкой температурой и сезонным перепадом всего в несколько градусов, высокой насыщенностью кислородом. В донных осадках преобладают глинистые илы с рудной коркой, бедные органическими веществами. Количество видов, способных существовать в таких экстремальных условиях, невелико, и представлены они экологически пластичными формами [7].

Средние величины численности макрозообентоса Онежского озера в целом (без учета литоральной зоны) в 2014 году составили 492 экз./м<sup>2</sup>, биомассы – 1,7 г/м<sup>2</sup> и в 2015 году – 1284 экз./м<sup>2</sup>, биомассы – 4,2 г/м<sup>2</sup> (Таблица 1). В течение двух лет наблюдений по численности доминировали малощетинковые черви (46% – в 2014 г, 64% – в 2015 г). По биомассе среди



макрозообентоса преобладали рачки Amphipoda (54% – в 2014 г, 56% – в 2015 г). Доля личинок хирономид была незначительной и по численности варьировала от 12 до 13 %.

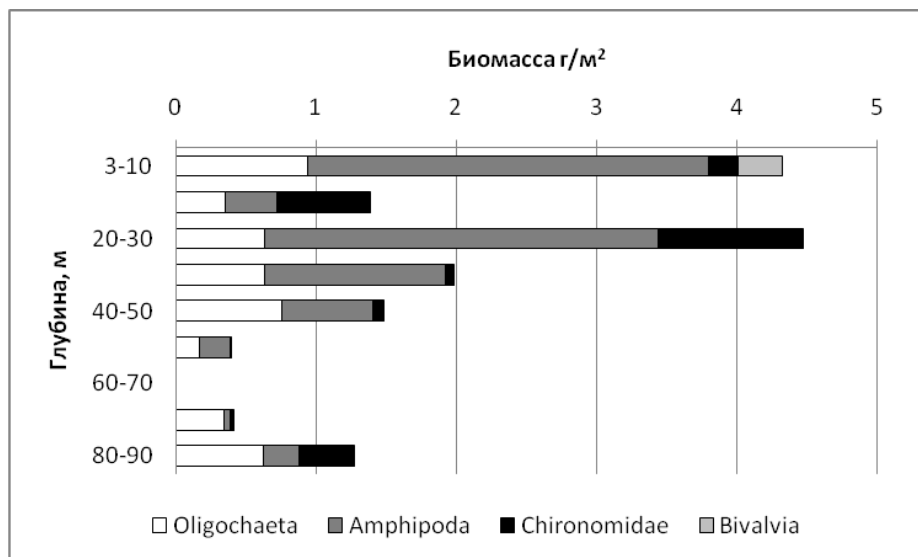
Анализ распределения донных организмов по глубине в 2014 году показал, что наибольшие биомассы сосредоточены в прибрежной зоне до 10 м и на глубинах от 20 до 30 м, что согласуется с опубликованными материалами 2010-х годов [11; 20] (Рис. 1).

*Таблица 1*

*Состав и среднегодовые количественные характеристики макрозообентоса Онежского озера в 2014-2015 гг. (за пределами литоральной зоны)*

Таксон	N	N%	B	B%	f%
2014					
Oligochaeta	228,33	46,39	524,78	30,95	86
Amphipoda	195,00	39,62	922,83	54,42	75
Bivalvia	1,67	0,34	17,44	1,03	6
Chironomidae	67,22	13,66	230,57	13,60	72
Сумма	492,22	100,00	1695,62	100,0	
2015					
Oligochaeta	827,14	64,40	1202,71	28,47	93
Amphipoda	307,14	23,92	2360,00	55,87	71
Chironomidae	150,00	11,68	661,14	15,65	75
Сумма	1284,29	100,00	4223,86	100,00	

**Примечание:** объем выборки – 36 проб (2014 г.); 28 проб (2015 г.). N – средняя численность экз/м<sup>2</sup>, N% – относительная численность; B – средняя биомасса, мг/м<sup>2</sup>, B% – относительная биомасса; f% – встречаемость.



*Рис. 1. Распределение макрозообентоса по глубинам в 2014 г.*

Отдельные заливы, Кондопожская и Петрозаводская губы, испытывают наиболее сильное антропогенное воздействие, в результате чего их экосистемы перешли в разряд мезотрофных, а по отдельным гидробиологическим показателям приобрели черты эвтрофии [11]. Особенно их вершинные районы, испытывают наибольшие нагрузки, что определяет характер их донных сообществ. В этих районах произошли значительные изменения гидробиологического режима, при наличии в каждом из них отличительных черт в масштабах воздействия на сообщества и

степени нарушенности последних. Заливы выделяются в целом высоким количественным развитием макрозообентоса, обилие которого выше, чем в открытом плесе. В сообществах наблюдаются неблагоприятные структурные преобразования, в особенности заметные на участках непосредственного антропогенного влияния. Они проявляются в снижении качественного разнообразия за счет исчезновения наиболее чувствительных к ухудшению экологических условий типичных представителей фауны олиготрофных водоемов, которых замещали и постепенно формировали состав доминирующего комплекса наиболее толерантные эврибионтные формы [18;23].

В Кондопожской губе основным загрязняющим фактором являются сточные воды ЦБК, содержащие большой набор органических и минеральных токсических веществ. Плотность донного населения губы в 2014 году составляет 1000 экз./м<sup>2</sup>, биомасса – 2,6 г/м<sup>2</sup>, в 2015 – численность макрозообентоса достигла 1376 экз./м<sup>2</sup>, при биомассе – 5,9 г/м<sup>2</sup>. Во все сезоны года доминируют олигохеты. В районе, расположенном вблизи выпусков, кроме различных высокотоксичных химических соединений, сточные воды содержат и значительные количества взвешенных веществ, древесных остатков и древесной ваты, оседающих на дно толстым слоем и способствующих созданию здесь мертвой зоны [7;23].

Вторым наиболее эвтрофируемым районом Онежского озера является Петрозаводская губа. Резкое увеличение фосфорной нагрузки ( $P_{\text{общ}}$ ) на Петрозаводскую губу началось в 1980-е гг. До середины 1990-х гг. ее величины от Петрозаводского промузла достигали 2,7, а с речным стоком – 1,2 г · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>. С конца 1990-х ситуация изменилась. Нагрузка  $P_{\text{общ}}$  с речным стоком (1,6 г · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>) стала преобладать над таковой от промузла – 1,4 г · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> [21]. Активный гидродинамический режим, седиментация взвешенного стока рек Шуя, Неглинка и Лососинка, влияние промышленных и хозяйственных сточных вод города Петрозаводска определяют разнородность в распределении и составе бентоса Петрозаводской губы [20]. Здесь средняя численность донных организмов в 2014 году составила 1000 экз./м<sup>2</sup>, при биомассе 3,4 г/м<sup>2</sup>, в 2015 году численность достигала 2680 экз./м<sup>2</sup> при средней биомассе – 4,6 г/м<sup>2</sup>. Макрозообентос был представлен тремя группами: олигохетами, личинками хирономид и амфиподами. Максимальными значениями выделяются бентические группировки внешней части губы, где плотность рачков достигала 11400 экз./м<sup>2</sup> в 2015 году.

В целом по Онежскому озеру пробах 2014 года обнаружены 32 таксономические единицы макрозообентоса, в 2015 – 26. Всего в Онежском озере было обнаружено 14 видов олигохет в 2014 г и 10 видов в 2015 г. Наиболее часто встречались малощетинковые черви – представители семейств Lumbriculidae и Tubificidae.

Амфиподы в период исследования были представлены в основном видом *Monoporeia affinis*, единично были отмечены *Pallasiola quadrispinosa* (Sars, 1867) и *Gammarus lacustris* Sars, 1867. В центральной части озера и Большом Онего из личинок хирономид был отмечен вид *Trissocladius parataticus* (Tshernovskij, 1949). В Кондопожской губе преобладает эврибионтный вид из личинок хирономид *Chironomus sp.*

Значительное увеличение уровня антропогенного воздействия на водоем ведет к упрощению экологической структуры донных сообществ или к их экологическому регрессу. Сообщества бентических животных при такой техногенной нагрузке адаптивно реагируют на изменения абиотических условий посредством системы регуляторных механизмов, достигая относительного соответствия своего механизма характеру изменяющихся условий обитания [1]. Для донных сообществ свойственны уменьшение числа видов, упрощение межвидовых отношений, упрощение пространственной структуры сообщества. При этом отмечается рост количественных показателей бентоса за счет немногих видов, преимущественно эврибионтных, большое развитие получают олигохеты [19].

Самыми распространенными видами малощетинковых червей в 2014 году в Онежском озере стали стенотермные виды *Lamprodrillus isoporus* (Michaelson, 1901) и *Lumbriculus variegatus* (Müller, 1774). Данные виды встречались повсеместно, кроме Кондопожской губы (Рис. 2).

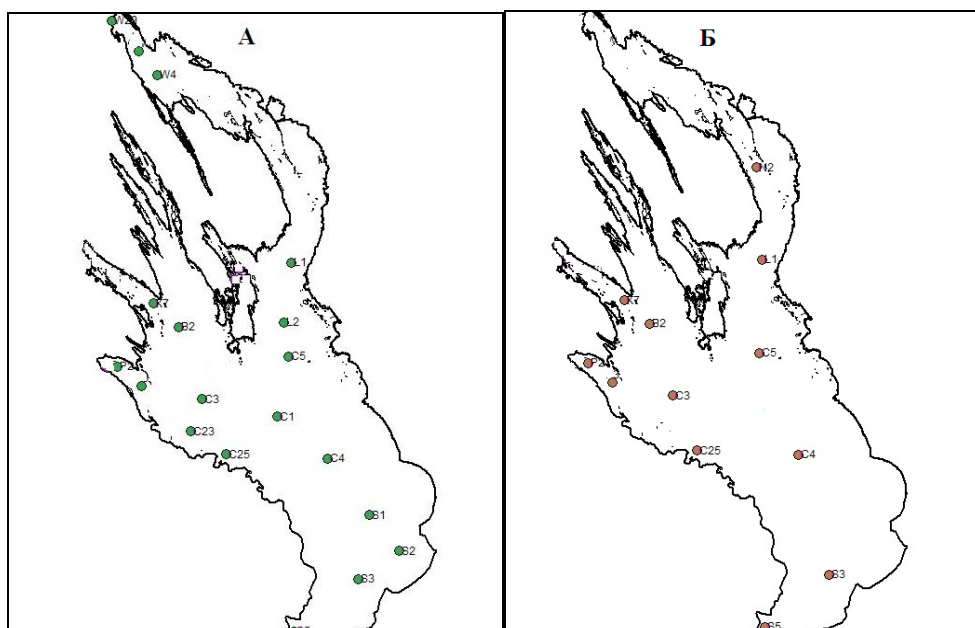


Рис. 2. Распространение олигохет *Lamprodrillus isoporos* (А) и *Lumbriculus variegatus* (Б) в Онежском озере в 2014 году.

В Кондопожской губе под влиянием стоков ЦБК изменился состав донных сообществ. Лидирующая роль стала принадлежать малощетинковым червям эвритопных видов *Tubifex tubifex* (Müller, 1774) и *Limnodrilus hoffmeisteri* (Claparede, 1862) (Рис. 3). Указанные виды также были многочисленны в пробах из Петрозаводской губы и Кижских шхер. Кроме того, единичные экземпляры были отмечены в центральном и малом Онего. В целом в бентических группировках северной части губы главенствует олигохетно-хириноmidный комплекс с преобладанием червей по численности и в несколько меньшей степени по биомассе. Значительные площади техногенных отложений этой зоны по-прежнему лишены организмов макробентоса. В северной части реликтовые амфиподы отсутствуют. Зоной их массового развития являются обширные глубоководные области центрального плеса и внешней части губы.

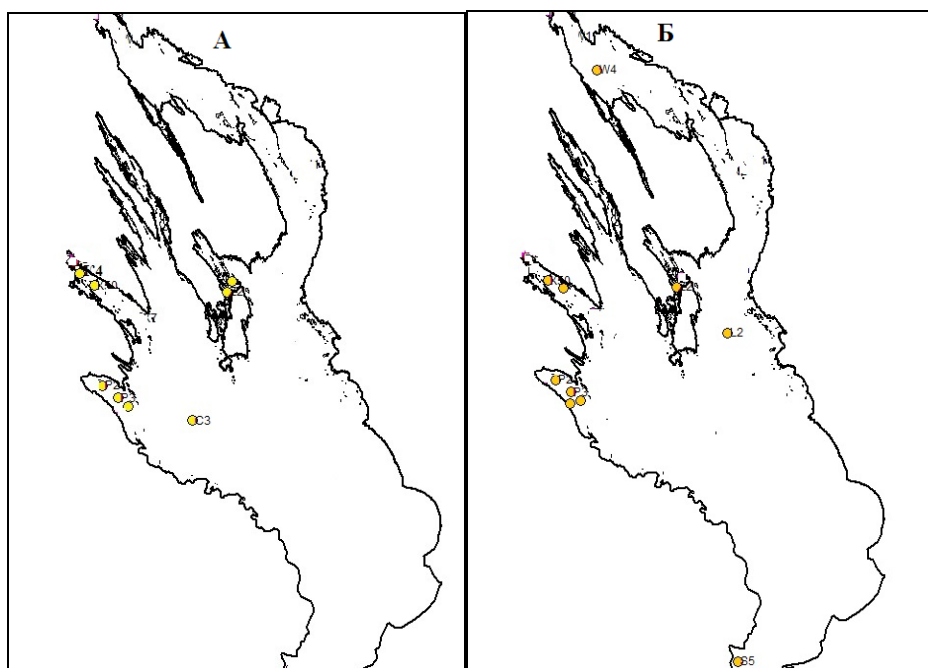


Рис. 3. Распространение устойчивых к загрязнению олигохет *Tubifex tubifex* (А) и *Limnodrilus hoffmeisteri* (Б) в Онежском озере в 2014 году.

Таким образом, в глубоководной части Онежского озера обнаружено в 2014 году 14 видов хирономид, 14 видов олигохет, 3 вида амфипод и один вид двустворчатых моллюсков, в 2015 году – 14 хирономид, 10 видов олигохет, 2 вида амфипод.

Как показали многолетние исследования, обширный профундальный район озера вследствие многоводности и низкой температуры до настоящего времени сохраняет свое изначально олиготрофное состояние и характеризуется низкой биопродуктивностью. В антропогенно-измененных Петрозаводской губе и Кондопожской губе преобладают эвритопные виды из малощетинковых червей *Tubifex tubifex* и *Limnodrilus hoffmeisteri*, из личинок хирономид *Chironomus* sp.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766).

#### Литература:

1. Абакумов В. А. Система гидробиологического контроля качества природных вод СССР / В. А. Абакумов // Актуальные проблемы охраны окружающей природной среды в Советском Союзе и Федеративной Республике Германии. Мюнхен. – 1981. – С. 491–528.
2. Александров Б. М. Об изучении состава донной фауны Онежского озера / Б. М. Александров // Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. – Вып. 3. Петрозаводск. – 1969. – С. 37–39.
3. Большая губа Повенецкого залива Онежского озера. Петрозаводск, – 1992. – 122 с.
4. Герд С. В. Биоценозы бентоса больших озер Карелии / С. В. Герд // Труды Карело – Финского государственного университета. Петрозаводск. – 1949. Т. 4. – 197 с.
5. Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии / С. В. Герд // Труды Карело – Финского отделения ВНИОРХ, Т. 11. Петрозаводск. – 1946. – С. 28–140.
6. Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск. – 1980. – 182 с.
7. Кауфман З. С. Донная фауна / З.С. Кауфман, Т. Н. Полякова // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. – 1990. – С.216–230.
8. Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск. –1986. – 172 с.
9. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л. – 1984. – 52 с.
10. Озерецковский Н. Путешествие по озерам Ладожскому, Онежскому и вокруг Ильменя. – СПб. – 1792.
11. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2010. – 151 с.
12. Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск. – 1999. –293 с.
13. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР (планктон и бентос). Л.: «Гидрометиздат». – 1977. – 511 с.
14. Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейств *Podonominae* и *Tanytoidinae* фауны СССР (*Diptera, Chironomidae=Tendipedidae*). Л. – 1977. – 153 с.
15. Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейства *Chironominae* фауны СССР (*Diptera, Chironomidae=Tendipedidae*). Л. – 1983. – 296 с.
16. Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейства *Orthoclaadiinae* фауны СССР (*Diptera, Chironomidae=Tendipedidae*). Л. – 1970. – 344 с.
17. Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск. – 1984. – 191 с.
18. Полякова Т. Н. Донные ценозы в условиях антропогенного эвтрофирования / Т. Н. Полякова // Онежское озеро. Экологические проблемы. – 1999. – С. 211–227.
19. Попченко В. И. Использование сообществ донных беспозвоночных в биомониторинге пресных вод / В. И. Попченко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – №2. – С212–217.

20. Рябинкин А. В. Макрозообентос озера и его роль в питании рыб / А.В. Рябинкин, Т. Н. Полякова // Биоресурсы Онежского озера. – 2008. – С.67–91.
21. Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Внешняя нагрузка на Онежское озеро / А. В. Сабылина // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. –2007. – С. 19–21.
22. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л., Наука. – 1990. – 263 с.
23. Kalinkina N. M. Bioindication of Water and Bottom Sediment Pollution in the Kondopozhskaya Bay of Lake Onego / N. M. Kalinkina, T. P. Kulikova, I. A. Litvinova, T. N. Polyakova, M. T. Syarki, E. V. Tekanova, T. M. Timakova, T. A. Chekryzheva // Water Resources. Vol. 39, – No. 7. – 2012. – P. 776–783.
24. Timm Tarmo. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe / T. Timm // *Lauterbornia. International Journal of Faunistics and Floristics of European Inland Waters*. – Vol. 66. – 2009. – 236 P.

### MACROZOOBENTHOS OF PROFUNDAL ZONE OF LAKE ONEGO

Anastasiya Ivanovna Sidorova,  
Ph. D, Research Associate  
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of RAS  
E-mail: [bolt-nastya@yandex.ru](mailto:bolt-nastya@yandex.ru)

*Abstract:* Due to large water volume and low water temperature, the profundal zone of Lake Onego preserve its oligotrophic state and low bioproductivity.

*Keywords:* macrozoobenthos, Lake Onego, oligochaetes

## ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ПРЕСНОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

Анатолий Васильевич Старовойтов,  
к. г.-м. н., доцент кафедры сейсмометрии и геоакустики  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
E-mail: starovoytov\_msu@mail.ru

Михаил Юрьевич Токарев  
ст. преподаватель кафедры сейсмометрии и геоакустики  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
ген. директор ООО «Центр анализа сейсмических данных  
МГУ имени М.В. Ломоносова»  
E-mail: tokarev@decogeo.com

Михаил Львович Владов  
д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой сейсмометрии и геоакустики  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
E-mail: vladov\_ml@mail.ru

Дмитрий Александрович Субетто  
д. г. н., профессор, директор Института водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН  
E-mail: dsubetto@nwpi.krc.karelia.ru

Антон Леонардович Марченко  
к. ф.-м. н., научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
E-mail: antonmarchenko@mail.ru

*Аннотация:* Обобщены материалы георадиолокационных наблюдений, выполненных на пресноводных акваториях в Центральной России, Карелии, на одном из озер в Красноярском крае и на реке Чекапа (Конго). Анализировались особенности строения верхней части разреза, глубинность исследований по воде и грунту и влияние удельного электрического сопротивления (УЭС) воды на эти параметры. Показано, что георадиолокационный метод в условиях высоких значений УЭС воды может успешно применяться при решении многих задач на акваториях при глубинах воды от 0,5 до 10-15м (геологических, поисковых, экологических, при строительстве различных сооружений и т.д.).

*Ключевые слова:* георадиолокация, пресноводные акватории, экология, четвертичная геология, поиск

При решении геологических, экологических и инженерных задач на пресноводных акваториях, для решения которых необходимо изучение верхней части разреза поддонных отложений, использовался, как правило, сейсмоакустический метод (НСП) с различными типами источников возбуждения упругих волн. Однако его применение иногда сильно ограничено по нескольким причинам, основными из которых являются следующие:

1. При малых глубинах (до 3-5 м) сильный фон различных волн-помех делает сейсмограммы практически не поддающимися интерпретации.

2. Часто встречающиеся в верхней части разреза газонасыщенные осадки делают применение сейсмоакустики на таких акваториях невозможным, особенно при работах на высоких частотах. В этом случае интервал для изучения разреза будет заключаться между дном и кровлей газонасыщенных осадков, а если они обнажаются на поверхности дна, то глубинность исследований будет равна нулю.

3. Метод НСП технически и технологически намного сложнее георадиолокации и для его выполнения требуются довольно большие суда с необходимым электропитанием. Большое значение имеет также осадка судна, которая практически всегда не позволяет проводить работы от уреза воды.

4. Метод НСП можно использовать только при отсутствии ледяного покрова.

Георадиолокационные исследования по сравнению с сейсмоакустическими обладают рядом преимуществ:

1. Работы проводятся с резиновых или пластиковых лодок, поэтому профили можно выполнять непосредственно от берега и на сверхмалых глубинах (от 0,5 м). Волны-помехи такого же типа, как и при сейсмоакустическом профилировании, не так критичны при интерпретации вследствие значительно меньшей длительности отраженных импульсов (наносекунды в георадиолокации и миллисекунды в НСП). Область интерпретации между отражением от дна и второй кратной от дна по этой причине существенно расширяется.

2. Газонасыщенные осадки не являются препятствием при георадиолокационном профилировании.

3. Георадиолокация в техническом и технологическом отношении намного более простой и дешевой метод по сравнению с методом НСП. Работы проводятся практически с любых небольших плавсредств (резиновых и пластиковых лодок), специальные энергоустановки не нужны.

4. Работы можно проводить и в зимнее время через лед.

Вместе с тем, есть два основных ограничительных фактора при георадиолокационном профилировании, которые резко уменьшают глубинность исследований – низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды и наличие глин и плотных суглинков в разрезе.

Георадиолокационное профилирование выполнялось на акваториях с различными значениями УЭС воды - от 22-24 Омм, (р. Москва) до значений в 550 Омм (оз. Вендюрское, Карелия). На акваториях с низкими значениями УЭС воды глубинность по воде не превышала 2-3 м, мощность изученных осадков также была незначительной. Так, на р. Москве поверхность дна практически не прослеживалась уже на 3,0 м, глубинность по грунту не превышала 1,5-2,0 м (рис. 1). На оз. Вендюрском с высоким УЭС воды разрез был изучен до глубины 12-15 м ниже дна при глубине воды около 6 м (рис. 2). Аналогичные результаты по глубине изучения разреза были получены на оз. Верхнем (ББС МГУ) – до 8 м (УЭС воды 360 Омм; рис. 3). Глубинность по грунту также сильно зависит от наличия слоя глин или плотных суглинков в разрезе, которые характеризуются сильным поглощением электромагнитных волн, однако стоит отметить, что при решении некоторых экологических задач (например, определение мощности сильнозагрязненных современных илов в водоемах в пределах городов) большая глубинность часто не требуется (рис. 4).

Георадиолокация эффективно применяется при решении ряда геологических и поисковых задач – при изучении геологического строения четвертичных отложений (рис. 2, 3), при строительстве разнообразных сооружений, изучении глубины залегания и морфологии кровли коренных пород с целью поисков месторождений россыпных полезных ископаемых (рис. 5), прокладке трубопроводов и т.д.

В крупных городских агломерациях при разработке мероприятий по очистке и реабилитации различных водоемов георадиолокационные наблюдения позволяют с высокой детальностью и разрешающей способностью по вертикали определять мощности загрязненного придонного слоя современных илов (от 5-10 см), которые являются источником вторичного загрязнения вод.

Георадиолокационные наблюдения на акваториях можно дополнять исследованиями на прилегающей суше, что позволяет иногда существенно повысить достоверность интерпретации даже при отсутствии данных бурения. При изучении верхней части разреза на глубину в несколько десятков метров на мелководных акваториях весьма эффективно комплексирование данных метода НСП и георадиолокации. Метод НСП позволяет изучать более глубокозалегающие толщи, а структуру разреза в придонной части – методом георадиолокации. Подобные работы были выполнены на Водоотводном канале в г. Москве.

Для интерпретации данных георадиолокации, получаемых на пресноводных акваториях, в целом применима методика, используемая для анализа сейсмических материалов.

Таким образом, имеющиеся материалы показывают, что при решении многих задач, возникающих при обследовании пресноводных водоемов с высокими значениями УЭС воды и при глубинах воды практически от 0 до 15-20 м, георадиолокация является весьма эффективным методом. Увеличение глубинности исследований можно ожидать при использовании более низкочастотных антенн – 25-100 МГц.

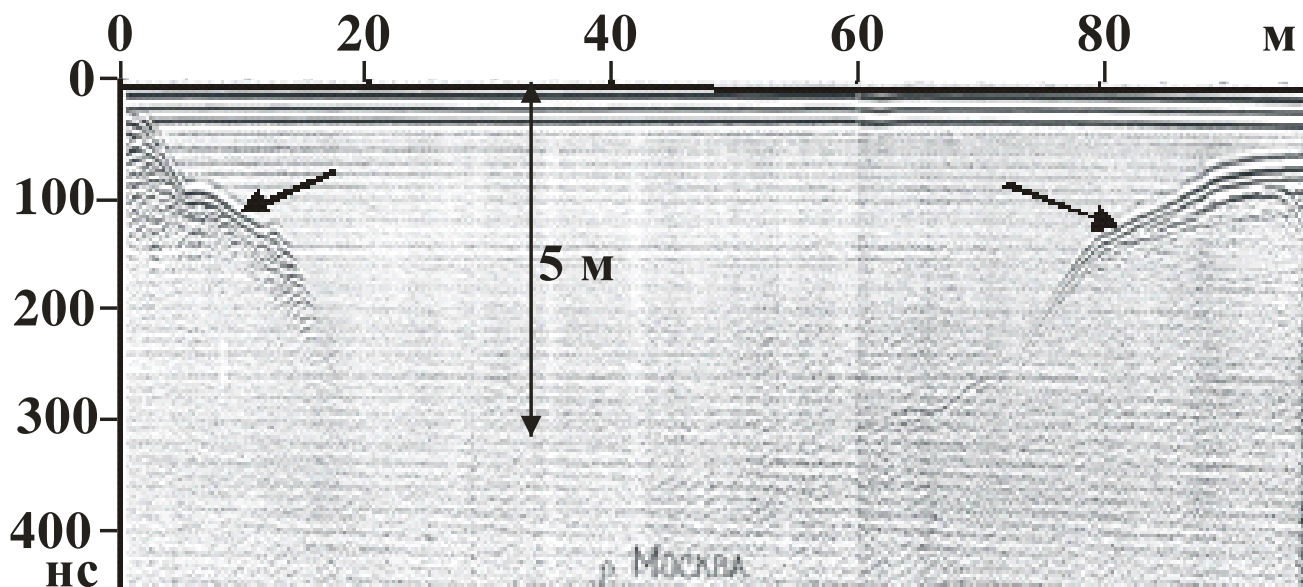


Рис. 1. Поперечный георадиолокационный профиль через р. Москва. Антенна 300 МГц.

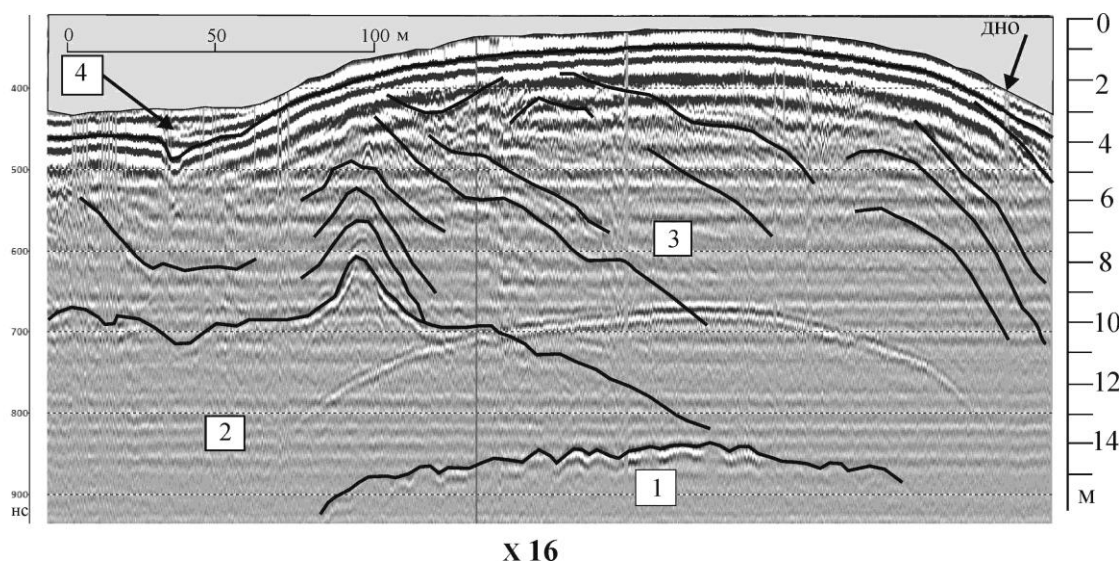


Рис. 2. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на Вендюрском озере (Карелия). Антенна 300 МГц. 1-фундамент; 2 – ледниковые отложения; 3 – ледниково-озерные отложения; 4 – современные озерные осадки. Вертикальная шкала для оценки мощности осадков, расположенная справа от профиля, рассчитывалась при скорости распространения электромагнитных волн 5 см/нс.



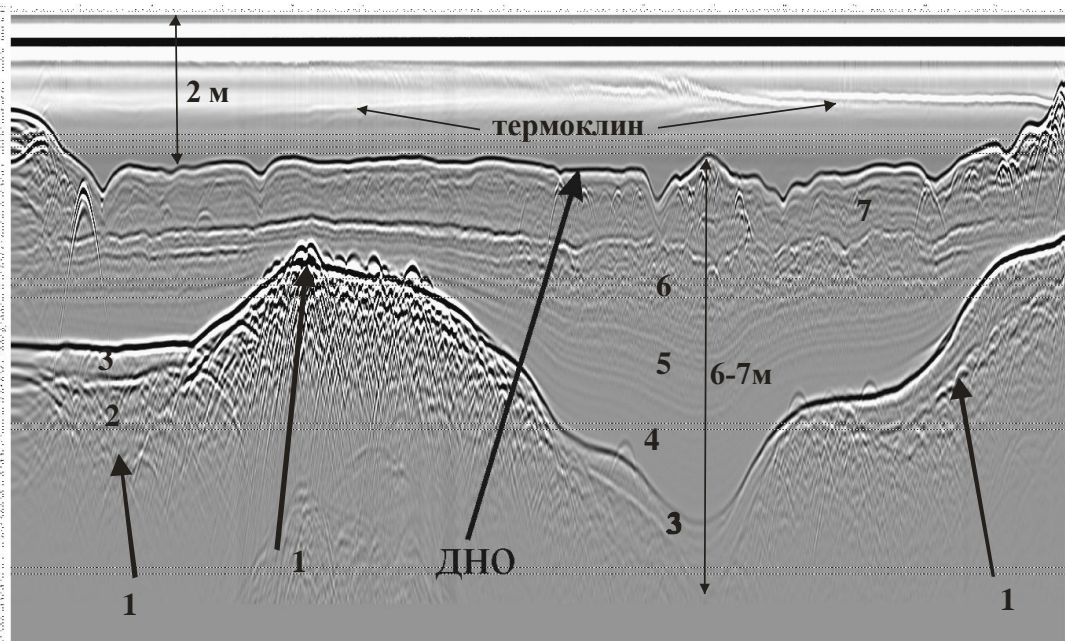


Рис. 3. Георадиолокационный профиль, выполненный на оз. Верхнем (ББС МГУ, Карелия). Антенна 300 МГц. 1-кровля фундамента (гнейсы); 2-7 – осадочные комплексы.

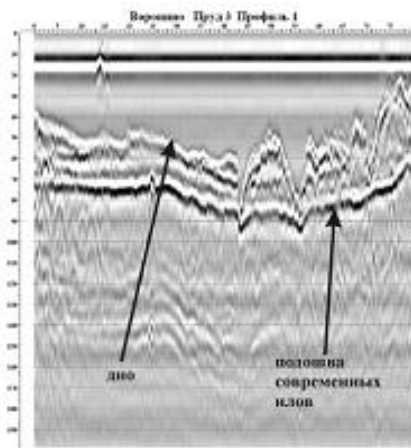


Рис. 4. Фрагмент георадиолокационного Профиля, выполненного на озере (Московская обл.) Антенна 300 МГц. Мощность сильнозагрязнённых Современных илов – 0.6-0.8 м.

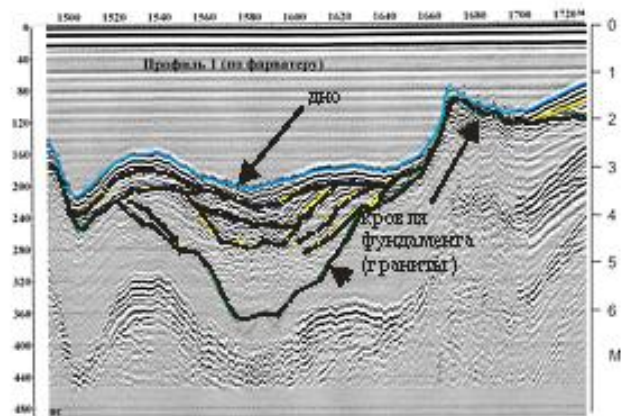


Рис. 5. Георадарограмма, полученная на р. Чекапа (Конго). Нижняя граница - кровля фундамента (граниты). Остальные границы являются границами между осадочными комплексами в четвертичных отложениях. Антенна 300 МГц. УЭС воды – 90 Ом. Цель работ – поиск россыпных месторождений алмазов.

## GPR OBSERVATIONS IN GEOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL STUDIES ON LIMNETIC WATER AREAS

Anatoly Vasilievich Starovoytov,  
Ph. D, assistant professor of seismics and geoacoustics chair  
M.V. Lomonosov Moscow State University

E-mail: starovoytov\_msu@mail.ru

Mikhail Yurievich Tokarev,  
Senior lecturer of seismics and geoacoustics chair  
M.V. Lomonosov Moscow State University

E-mail: tokarev@decogeo.com

Mikhail Lvovich Vladov,  
Doctor, professor, Head of seismics and geoacoustics chair  
M.V. Lomonosov Moscow State University

E-mail: vladov\_ml@mail.ru

Dmitry Aleksandrovich Subetto,  
Doctor, professor, Director Northern Water Problems Institute,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences

E-mail: dsubetto@nwpi.krc.karelia.ru

Anton Leonardovich Marchenko,  
Ph. D, Research fellow of seismics and geoacoustics chair  
M.V. Lomonosov Moscow State University

E-mail: antonmarchenko@mail.ru

*Abstract:* The GPR data acquired on limnetic water areas in Central Russia, Karelia, on one of the lakes in Krasnoyarsk Territory and on the Chekapa river (Congo). Peculiar features of the near surface, the depth of investigation within the water column and soil as well as the impact of water resistivity on these parameters were examined. It was shown that the GPR method can be successfully used for solving most problems within water areas (geological, exploration, environmental, in construction etc.) with water depths within the range from 0,5 to 10-15m under conditions of high water resistivity values.

*Keywords:* Ground Penetrating Radar; limnetic water area; ecology; Quaternary geology; exploration

## РАЗВИТИЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ. ЦИФРОВЫЕ КАРТЫ

Дмитрий Александрович Субетто,  
д.г.н., директор

Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН

E-mail: subetto@mail.ru

Максим Сергеевич Потахин,  
к.г.н., старший научный сотрудник

Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН

E-mail: mpotakhin@mail.ru

Михаил Борисович Зобков,  
к.т.н., научный сотрудник

Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН

E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Алексей Юрьевич Тарасов,  
к.и.н., старший научный сотрудник

Институт языка, литературы и истории  
Карельского научного центра РАН

E-mail: [taleksej@drevlanka.ru](mailto:taleksej@drevlanka.ru)

Наталья Александровна Белкина,  
к.г.н., старший научный сотрудник

Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН

E-mail: bel110863@mail.ru

Татьяна Станиславовна Шелехова,  
к.г.н., старший научный сотрудник

Институт геологии Карельского научного центра РАН

E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

*Аннотация:* При помощи ГИС-методов проведены палеогеографические реконструкции Онежского приледникового озера в позднем плейстоцене (14,5-12,3 тыс. л.н.). Около 14,5 тыс. л.н. водоем занимал южную часть впадины современного озера, его уровень контролировался порогом стока на водоразделе между рр. Ошта и Оять (площадь не превышала 2800 км<sup>2</sup>). 14,0 тыс. л.н.: ледник отступил из долины р. Свири, водоем увеличился в размерах и получил новый порог стока в Ладожское озеро (площадь около 14 000 км<sup>2</sup>). 13,3 тыс. л.н.: озеро достигло максимальных размеров и вышло далеко на север за пределы современного водосбора (площадь достигла 33 000 км<sup>2</sup>). 13,2-12,3 тыс. л.н.: произошло несколько крупномасштабных регрессий водоема вызванных открытием стока на север в Белое море около 13,0 тыс. л.н. (площадь уменьшается до 26 000 км<sup>2</sup>), а затем опять в Ладожское озеро (сокращение площади до 18 000 км<sup>2</sup>).

*Ключевые слова:* Онежское озеро, палеорекострукции, плейстоцен, ГИС, цифровые карты

Онежское озеро — второй по величине пресноводный водоемом Европы с площадью водной поверхности около 10 000 км<sup>2</sup>. Его котловина расположена в глубокой тектонической депрессии на границе двух геологических структур — Фенноскандинавского кристаллического щита и Русской плиты. На протяжении плейстоценовых скандинавских оледенений она неоднократно была вместилищем ледниковых потоков, а в межледниковые периоды морских и пресноводных

водоемов [7]. В настоящее время существует ряд авторских моделей развития котловины Онежского озера в позднеледниковье. К ним относятся работы Б. Ф. Землякова [4], М. Н. Порывкина [8], Г. С. Бискэ [1], Д. Д. Квасова [5], М. Saarnisto [10], И. Н. Демидова [2;3] и др. Все эти модели по-разному оценивают уровни и размеры Онежского приледникового озера (ОПО), а так же гляциоизостатическое поднятие его берегов.

Реконструкция развития Онежского озера была проведена с помощью современных геоинформационных систем (ГИС) на основе разработанной цифровой модели рельефа (ЦМР), содержащей котловину водоема и его водосбор. Для построения ЦМР в качестве основного рабочего инструмента использовалось программное обеспечение (ПО) фирмы ESRI (ArcGisforDesktop 10.2 с пакетом SpatialAnalysis). Цифровая модель рельефа водосборной территории была взята с Интернет-ресурса «Viewfinder Panoramas» [9]. Данная ЦМР создана автором сайта Jonathan de Ferranti на основе USGS STRM DEM с пространственным разрешением 90 м. Данные о строении котловины получены с навигационных карт Онежского озера. Привязка положения береговой линии и островов осуществлялась при помощи спутниковых снимков пространственным разрешением 50 м. Промеры глубин были оцифрованы в проекции UTM Merkator WGS 84, зона 36 для северного полушария. Расчет сетчатого файла производился в ГИС Surfer 10 с использованием метода Кригинга, шаг сетки составлял 20 м. Затем ЦМР водосбора и котловины озера были совмещены с помощью ПО ArcGis for Desktop 10.2, пространственное разрешение получившегося растра составило 90 м. Растр геостатического поднятия рассчитывался только для одного временного интервала (13 300 л.н.) путем интерполяции высотных данных трехмерным полиномом 1-й степени с использованием ПО Surfer 10. При этом в качестве входных данных для растра использовалась разность палеоуровня и современного уровня озера. Далее производилось вычитание растра геостатического поднятия из растра водосборной территории, содержащего котловину озера. Палеоуровень озера строится по современной отметке уреза воды (33 м) для периода 13 300 л.н, а для других временных интервалов путем построения изолиний по отметкам  $33 \text{ м} \pm \Delta h$ , где  $\Delta h$  — разница в положении вертикальных отметок исследуемого периода и 13 300 л.н.

Отметки уровня водоема в различные геологические периоды взяты из базы данных PaleoOnego, обобщающей сведения по колонкам донных отложений озер расположенных в пределах и непосредственной близости границ максимальной стадии развития ОПО. В настоящее время база данных включает описание 60 разрезов донных отложений (по 50 разрезам данные получены из архивных и литературных источников, по 10 — в ходе проведения экспедиционных работ в течение 2014-2016 гг.). В качестве исходной концепции для палеореконструкций была принята модель дегляциации котловины Онежского озера, предложенная И. Н. Демидовым [2;3]. Она включает шесть основных этапов развития котловины озера в позднеледниковье, которые были реконструированы по приведенной выше методике (рис. 1-6).

I этап (начало формирования приледникового водоема). Потепление климата в бёллинговом межсезонье обусловило интенсивное таяние ледника, он отступил от краевых образований лужской стадии и в районе южного побережья современного Онежского озера стал формироваться приледниковый водоем. Возможно, на самых ранних этапах развития ОПО входило в систему Верхневолжских озер, для которых был характерен уровень 120-130 м [5]. Около 14,5-14,4 тыс. л.н. произошло открытие стока в бассейн Балтики по долине рек Ошта — Тукша — Оять [3] и снижение уровня водоема (со 120 до 106 м) в результате размыва рыхлых отложений развитых на пороге стока. Площадь водоема в этот период не превышала 2800 км<sup>2</sup> (рис. 1).

II этап (освобождение котловины озера). Продолжающееся в аллёрде потепление способствовало таянию ледника и постепенному освобождению озерной котловины ото льда. Около 14,3 тыс. л.н. край ледника отступил из долины р. Свири и ОПО получило новый, более низкий порог стока [11]. В результате уровень водоема в южной части упал до 85-75 м и сохранялся на этих отметках на протяжении почти 900 лет [2].

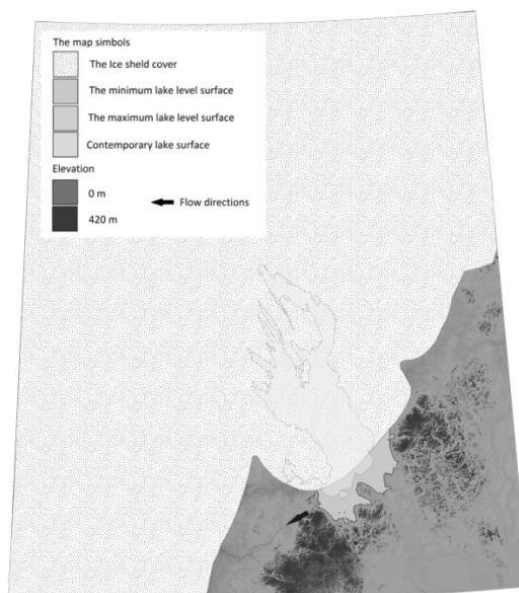


Рис. 1. Онежское приледниковое озеро (14,5 тыс. л.н./)

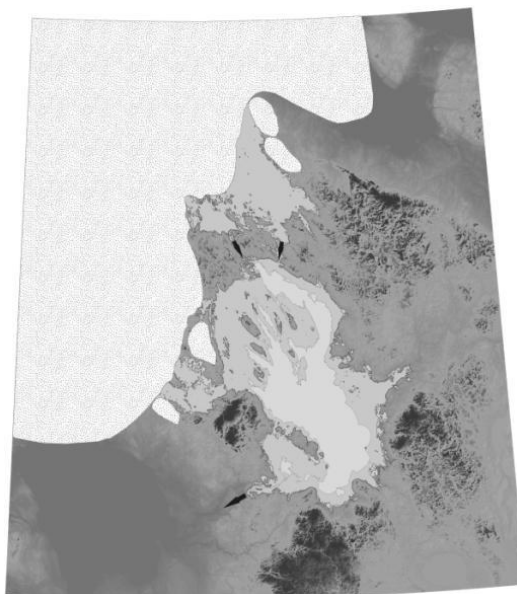
Около 14,0 тыс. л.н. северная часть озерной котловины, включая Заонежский полуостров, все еще была занята льдом [3]. На северо-западе край ледника протягивался вдоль северных границ Шуйской низменности, где в это время существовал приледниковый водоем. Площадь водоема на этом этапе превысила 14 000 км<sup>2</sup> (рис. 2).



Рис. 2. Онежское приледниковое озеро (14,0 тыс. л.н./)

III этап (максимальное развитие приледникового озера). К концу аллёрда ОПО достигло максимальных размеров и вышло далеко на север за пределы современного водосбора. Край ледника протягивался от северного побережья Ладожского озера к Белому морю, при этом водоем оставался прогляциальным и непосредственно контактировал с краем ледника на западных побережьях Выгозера, Сегозера, Сямозера, Шотозера. Он включал современные озерные котловины Сегозера и Выгозера в пределах абсолютных высот от 140 м на западе до 115 м на востоке, Шуйскую низменность (до отметок 120-130 м) и значительные площади Водлинской и Ивинской низменностей [2; 10; 5]. В районе Медвежьегорска и Петрозаводска уровень ОПО достигал 120-125 м, в южном Прионежье — 85-75 м, в этот период на дне водоема отлагались

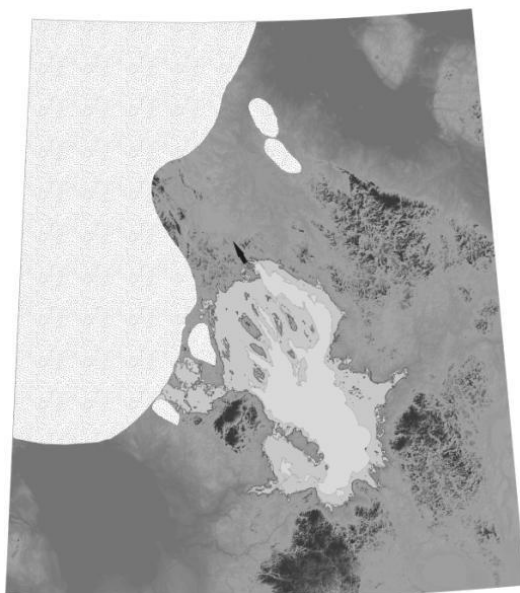
типичные ленточные глины. Площадь водоема в этот период достигла 33 000 км<sup>2</sup> (рис. 3), превысив современные размеры более чем в три раза.



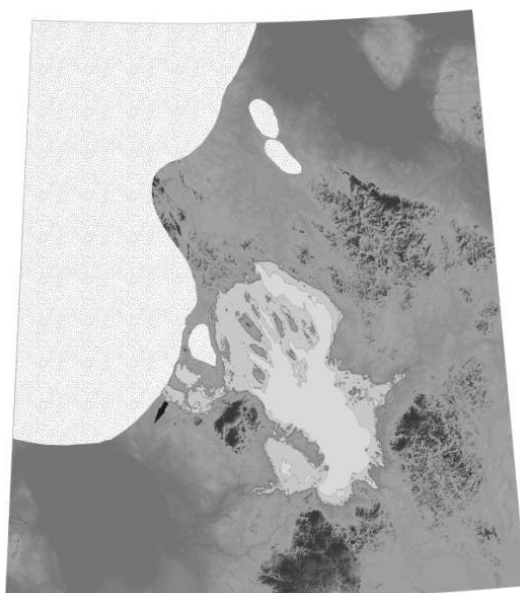
*Рис. 3. Онежское приледниковое озеро (13,3 тыс. л.н.).*

IV этап (I-я регрессия). В конце аллёрда — начале позднего дриаса произошла масштабная регрессия ОПО, которая отразилась на строении береговых и донных образований водоема. Она происходила не в один, как предполагалось ранее, а в два этапа [3]. Об этом свидетельствует строение и положение высотных отметок порогов стока и основных флювиогляциальных дельт, а также положение края ледника во время регрессии. На первом этапе озеро получило новый порог стока в котловину Белого моря, его уровень снизился не более чем на 10 м, и определялся высотой порога стока на Онежско-Выгозерском водоразделе. От ОПО отделились котловины Сегозера и Выгозера, площадь водоема сократилась почти в полтора раза до 26 000 км<sup>2</sup> (рис. 4).

V этап (II-я регрессия). На втором этапе ОПО получило новый порог стока в Ладожское озеро через северную часть Онежско-Ладожского водораздела. Уровень озера упал примерно на 15 м, после чего на протяжении почти всего позднего дриаса наступил длительный период его стабилизации [2]. Площадь водоема сократилась до 24 000 км<sup>2</sup> (рис. 5). В результате регрессии и кардинальной смены направления течений изменилась гидрохимическая обстановка на границе вода - донные отложения, что вызвало окисление приповерхностного горизонта донных осадков и формирование горизонта розовато-коричневатых ленточных глин («розового» горизонта) мощностью 10-15 см, распространенного практически по всей территории ОПО [3].



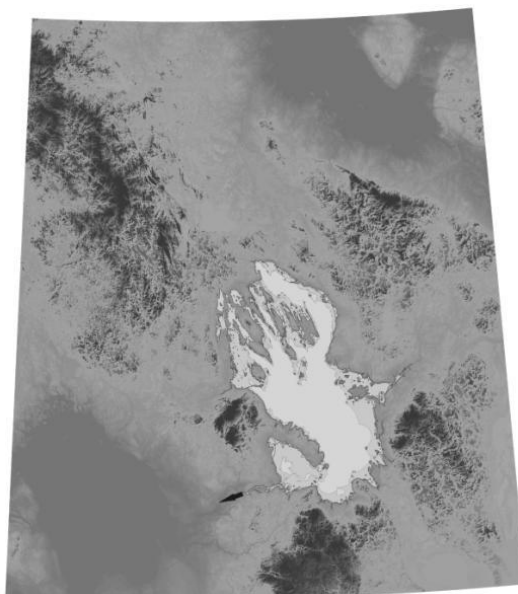
*Рис. 4. Онежское приледниковое озеро (13,2 тыс. л.н.).*



*Рис. 5. Онежское озеро (12,4 тыс. л.н.).*

VI этап (III-я регрессия). В конце позднего дриаса, после возобновления стока через р. Свирь в Ладожское озеро, произошла очередная регрессия Онежского озера, уже потерявшего связь соступившим на запад краем ледника [3]. Она вызвала падение уровня водоема примерно на 20 м, что привело к осушению больших площадей в береговой зоне и значительному врезанию рек. Площадь водоема сократилась до 18 000 км<sup>2</sup> (рис. 6).





*Рис. 6. Онежское озеро (12,3 тыс. л.н.).*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766).

#### Литература:

1. Бискэ Г. С., Лак Г. Ц., Лукашов А. Д. и др. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск, 1971. 74 с.
2. Демидов И. Н. Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 134-142.
3. Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 171-182.
4. Земляков Б. Ф. Четвертичная геология Карелии. Петрозаводск, 1936. 103 с.
5. Квасов Д. Д. Происхождение котловины Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л., 1976. С. 7-40.
6. Марков К. К. Геохронологические исследования в Карельской АССР // Природа. 1931. № 4. С. 377-402.
7. Онежское озеро. Атлас. / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
8. Порывкин М. Н. Образование поперечных террас реки Вытегра и история развития Онежского озера // Труды Гидропроекта. Сб. 3. М., 1960. С. 221-233.
9. Ferranti J. Digital Elevation Data. [Электронный ресурс] // [viewfinderpanoramas.org](http://viewfinderpanoramas.org) информ.-справочный портал. 2014. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (дата обращения: 25.04.2016).
10. Saarnisto M., Gronlund T., Ekman I. Lateglacial of Lake Onega — contribution to the history of the eastern Baltic basin // Quaternary International. 1995. Vol. 27. P. 111-120.
11. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkya End Moraine // Global and Planetary Changes. 31. Elsevier Science. 2001. P. 333-405.



## DEVELOPMENT OF LAKE ONEGO IN THE LATE PLEISTOCENE. DIGITAL MAPS

Dmitry Aleksandrovich Subetto,  
D.Sc., Director  
Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: subetto@mail.ru

Maxim Sergeevich Potakhin  
Ph.D., Senior Researcher  
Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: mpotakhin@mail.ru

Mikhail Borisovich Zobkov,  
Ph.D., Researcher  
Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Alexey Yurevich Tarasov,  
Ph.D., Senior Researcher  
Institute of Linguistics, Literature and History  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: taleksej@drevlanka.ru

Natalia Aleksandrovna Belkin,  
Ph.D., Senior Researcher  
Northern Water Problems Institute  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: bel110863@mail.ru

Tatyana Stanislavovna Shelekhova,  
Ph.D., Senior Researcher  
Institute of Geology  
Karelian Research Centre of the RAS  
E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

*Abstract:* Palaeogeographical reconstructions of the Onego ice-dammed lake development ca 14500-12300 yrs BP were based on the GIS approach. The palaeo-water-level surfaces were interpolated using a point-kriging approach. 14500-14000 Yrs BP: An ice-dammed lake occupied the southern part of the Lake Onego depression. The level of this lake was at 130-120 m a.s.l. and was controlled by a threshold of the water divide between the River Oshta and River Oyat'. The surface area of the ice-dammed lake was 2800 sq.km. 14000-13200 Yrs BP: When the ice melted away from the mouth of the River Svir, the lake level dropped to 85-80 m a.s.l. and runoff was directed into the Lake Ladoga. The surface area was 14 000 sq.km. 13200-12300 Yrs BP: As the glacier retreated from the Lake Onego depression, the ice-dammed lake was occupied it and reached the maximum sizes (the surface area was 33 000 sq.km).

*Keywords:* Lake Onego, paleoreconstruction, Pleistocene, GIS, digital maps

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Мария Тагевна Сярки  
к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
ФГБУН Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН  
e-mail: [msyarki@yandex.ru](mailto:msyarki@yandex.ru)

*Аннотация:* Оценка устойчивости функционирования планктона Онежского озера и прогноз его состояния в условиях изменения интенсивности антропогенной нагрузки и климатических колебаний становится все более актуальным. Для анализа долговременных изменений в планктоне необходимо знать масштабы их внутри годовой и межгодовой изменчивости, или циклической и стохастической компоненты. Для изучения устойчивости функционирования планктона были предложены два подхода: дискретный и непрерывный. С помощью первого в годовом цикле были выделены фенологические фазы, определены их особенности, сроки и продолжительность, а также наличие переходных периодов, возникающих из-за межгодовой изменчивости термического режима. С помощью второго подхода была создана серия моделей, описывающая посуточное среднемноголетнее состояние планктона за вегетационный период. Были определены основные закономерности динамики показателей планктона, траектории, абсолютные и относительные скорости процессов. Была обнаружена связь вычисленных скоростей с продукционными показателями планктона. Была рассмотрена синхронность динамики элементов планктона друг с другом и с факторами среды. Была подтверждена высокая устойчивость пелагического планктона Онежского озера.

*Ключевые слова:* пелагический планктон, годовая цикличность, фенология планктона, сезонная динамика, межгодовая изменчивость, климатические изменения

Онежское озеро, одно из Великих озер Европы, является важнейшим водным объектом России со стратегическим запасом пресной воды. Высокое качество воды его зависит от функционирования озерной экосистемы, в том числе, и пелагического планктона. В настоящее время, в условиях изменения интенсивности антропогенной нагрузки и климатических колебаний оценка устойчивости функционирования планктонной системы становится все более актуальной [1,2].

Планктон является классическим примером сложной многокомпонентной системы со стохастическим способом управления и самоорганизации. Из-за того, что большая часть видов, его образующих имеют короткие жизненные сроки (от нескольких дней до нескольких недель), сезонная сукцессия воспроизводится ежегодно. В ней проявляются как общие закономерности годовой цикличности видов и сообществ, так и случайные факторы текущих условий среды. Из-за относительно небольшого возраста озера и формирования его фауны (около 14,5 тыс. лет) [3] в нем не успели образоваться эндемичные виды и узко специализированные связи. Большая часть элементов планктона обладает широким спектром трофических связей и взаимозаменяемы. Это способствует проявлению синергии, при которой планктон ведет себя как единая целая система и не зависит от динамики составляющих ее элементов.

Выраженная годовая цикличность планктона определяется как внешними факторами среды (температура, освещенность и т.д.), так и внутренними факторами, характерными для планктонных популяций (жизненные циклы, конкурентные отношения и т. п.). Большая сложность изучения динамики планктона в целом привела к необходимости исследования цикличности отдельных показателей (численности и биомассы как общего планктона, так и отдельных его групп, первичной продукции, разнообразия сообществ и т.д.), чтобы на их основе понять наиболее общие закономерности организации планктона озера и всей экосистемы.

Целенаправленное исследование сезонных процессов началось в 80-90-х годах прошлого века. Но, к сожалению, временные ряды данных о планктоне Онежского озера, особенно в центральной его части, недостаточно полны и регулярны, чтобы обрабатывать их стандартными методами. Большая часть съемок производилась один раз в году, в различные сезоны. Проследить сезонные особенности конкретных лет не представляется возможным, поэтому было предложено создать модель среднемноголетней годовой цикличности планктона озера и затем сравнить с ней с конкретные ситуации [4,5].

Для анализа и изучения годовой цикличности планктона были предложены два подхода: дискретный и непрерывный.

Первый подход предполагает выявление естественной периодизации в годовом цикле планктона, т.е. отдельных сезонов, по его функциональным, структурным и количественным характеристикам. Например, с помощью статистического анализа структуры зоопланктона были выделены 5 сезонных состояний или фенологических фаз. Были описаны даты границ сезонов и их продолжительность, а так же особенности структуры. Так, было показано, что летний период в центральной части озера очень короткий и длится всего 40 суток, при этом в нем выделяются две различных по структуре фазы. В первой, ранне-летней, преобладают коловратки, во втором, позднее-летней, - ветвистоусые [6]. В заливах, из-за особенностей их термического режима летняя фаза длится дольше, например, в Петрозаводской губе она продолжается 66 суток [7]. Были описаны переходные периоды, отражающие межгодовые колебания условий среды. Ширина этих переходных периодов может служить критерием устойчивости годового цикла планктона и влияния на него колебаний внешних факторов, в частности температурного режима и его сдвигов при климатических изменениях.

Анализ динамики интенсивности первично-продукционного процесса и его синхронности с цикличностью факторов среды позволил для него выделить 5 фаз, различающихся по структуре фитопланктона и показать их связь с термическим и гидрологическим режимом озера [8].

Второй подход предполагает рассмотрение сезонной динамики показателей, как непрерывного циклического процесса. Из-за воздействия синоптических и стохастических факторов реальная динамика величин может носить сложный и прихотливый характер. Среднемноголетняя траектория при этом является плавной кривой и может быть представлена как простой циклический аттрактор. Распределение реальных данных вокруг этой кривой носит вероятностный характер. Анализ и сглаживание данных многолетних рядов показали, что форма распределения большей части процессов в пелагическом планктоне озера соответствует одновершинной асимметричной кривой, которая может быть аппроксимирована заданной функцией. Параметры функции определялись с помощью нелинейного регрессионного анализа по методу минимизации ортогональных расстояний (Orthogonal Distance Regression) [4]. Программная реализация метода ODR, свободно доступна в интернете в библиотеке SkyPy для языка Питон (Python, модуль ODR).

В качестве критерия устойчивости сезонных процессов было предложено соотношение закономерной, т.е. объясненной моделью, и случайной, т.е. остаточной составляющей в общей дисперсии. Количественной оценкой дисперсий являлись величины стандартного отклонения ( $\sigma$ ) как всего ряда, так и модельных остатков. Было показано, что внутригодовая изменчивость показателей зоопланктона обеспечивает 50-80% общей дисперсии рядов данных и преобладает над межгодовой и стохастической компонентой дисперсии [5]. Сравнение современных данных и данными предыдущих лет исследований показало, что зоопланктон пелагиали центральной части озера, его структура и характер сезонных процессов не изменились с 1960-х годов [9]. Это также свидетельствует о том, что планктонные системы в этом районе достаточно устойчивы и находятся в состоянии динамического равновесия.

Годовая динамика процесса первичного продуцирования в центральном районе озера так же более чем на 50% определяется сезонными закономерностями. Увеличение изменчивости в данных и появление отскакивающих точек являются индикатором начального этапа нарушения стабильности процессов. Так, анализ сезонного цикла первичной продукции и структуры

зоопланктона показал, что планктонная система залива Большое Онего испытывает спорадические воздействия от выноса трансформированных сточных вод ЦБК из Кондопожской губы [10].

Многолетняя трендовая компонента изменчивости явно наблюдается в Кондопожской губе, где сообщество зоопланктона трансформировано под влиянием антропогенных факторов, причем степень трансформации зависит от интенсивности их воздействия или объема сточных вод кондопожского ЦБК [11,12]. При высокой интенсивности антропогенного воздействия неустойчивость планктонных систем возрастает, что сказывается на уменьшении доли модельной компоненты в цикле биомасс рачкового планктона до 25% , против 70% в центральном районе озера, сохранившем свой естественный статус.

Неожиданным результатом явилась относительно высокая устойчивость циклики коловраток, тогда как большинство исследователей указывают на высокую изменчивость их показателей, значительно превосходящую изменчивость величин всего зоопланктона и других его групп [13, 14]. Во-первых, повышенная изменчивость коловраток связана с быстрой реакцией на изменения факторов среды (температуры, трофических условий или антропогенного воздействия). В таком случае низкая изменчивость в динамике коловраток свидетельствует о высокой стабильности среды их обитания в центральной части Онежского озера. Во-вторых, необходимо учесть влияние методических особенностей отбора материала. Изменения в численности коловраток происходят очень быстро, в течение нескольких дней и частота отбора проб, как правило, не позволяет отследить весь процесс. Если не учитывать динамику при анализе рядов, наблюдается большой разброс данных и высокие значения дисперсии. Предложенная модель описала процесс динамики в целом и упорядочила отдельные наблюдения по фазам сезонного развития, что позволило значительно увеличить информативность количественных данных по коловраткам.

Оценки временных колебаний в межгодовой изменчивости планктона показали, что их масштабы вполне сопоставимы с таковым для основных гидрологических событий (вскрытие льда, весенняя гомотермия, наступление биологического лета) [2,3,15]. Был определен период, в последней декаде июня – первой декаде июля, когда наблюдались максимальные отклонения параметров рачкового планктона от средней траектории. Так экстремально теплые и ранние весны вызвали сдвиг относительно средних дат в развитии рачкового планктона в июле 1989 г. на 14 суток и в 2010 г. – на 19 суток. Подобные сдвиги отражают высокую изменчивость весенней скорости прогрева воды и связаны с климатическими условиями.

Анализ цикличности планктона центральной части Онежского озера подтвердил ее устойчивый характер. Выявленные особенности сезонной динамики, сроки фенологических фаз и масштабы межгодовой изменчивости должны быть приняты во внимание при оценке состояния экосистемы озера и учитываться в системе биомониторинга.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766)».

#### Литература:

1. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калининной, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – 375 с.
2. Филатов Н. Н. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты / Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, А. В. Семенов, А. Р. Анциферова, В. Н. Ожигина, М. И. Богдан // Арктика: экология и экономика. – 2012. №2 (6). – С. 80-93.
3. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. – 2010. – 151 с.
4. Сярки М. Т. О применении метода ортогональных расстояний для моделирования сезонной динамики планктона Онежского озера / М. Т. Сярки, С. П. Чистяков // Экология. – 2013, № 3, – С. 234-236.

5. Сярки М. Т. Разработка подходов к оценке устойчивости функционирования водных сообществ / М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Н. М. Калинкина, Т. П. Полякова // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях.– Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2015. – С.133-145.
6. Сярки М. Т. Как долго длится лето для зоопланктона Онежского озера? // Принципы экологии. – 2013. № 4.– С. 70–75. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2781
7. Сярки М. Т. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера / М. Т. Сярки, Ю. Ю. Фомина // Труды Карельского научного центра РАН. – 2015, №1. – С. 63-68.
8. Теканова Е. В. Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера / Е. В. Теканова, М. Т. Сярки // Известия РАН. Сер. Биологическая.– 2015, №6. – С. 645-652
9. Сярки М. Т. Оценка современного состояния экосистемы Онежского озера по гидробиологическим показателям и устойчивости функционирования водных сообществ. Зоопланктон / М. Т. Сярки // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.– 2015. – С.121-127.
10. Сярки М.Т. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере / М.Т. Сярки, Е.В. Теканова // Известия РАН. Сер. биологическая. – 2008, №5. – С. 621-625.
11. Калинкина Н.М. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината / Н. М. Калинкина, Т.П. Куликова, И.А. Литвинова, Т.Н. Полякова, М.Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т.А. Чекрыжева // Водные ресурсы, 2014, т.41, №1, с. 74-82
12. Куликова Т. П. Влияние антропогенного евтрофирования на распределение зоопланктона в Кондопожской губе Онежского озера / Т.П. Куликова, М.Т. Сярки // Водные ресурсы. - 2004.- Том 31. - № 1. - С.91–97.
13. Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. – СПб., 1996. 190 с.
14. Куликова Т. П. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера / Т. П. Куликова, Н. Б. Кустовлянкина, М. Т. Сярки. – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. – 1997. – 112 с.
15. Филатов Н. Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России / Н. Н. Филатов, Л. А. Руховец, Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, Т. В. Ефремова, Н. И. Пальшин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – № 34. Научно-теоретический журнал. Специальный выпуск.– СПб.: РГГМУ. – 2014. – С. 48–55.

## DEVELOPMENT OF APPROACH TO ASSESSMENT OF THE PLANKTON FUNCTIONING STABILITY IN THE ONEGO LAKE

Maria Tagevna Syarki

PhD., senior scientist of laboratory of hydrobiology

Northern Water Problems Institute Karelian Research Center

Russian Academy of Sciences

e-mail: [msyarki@yandex.ru](mailto:msyarki@yandex.ru)

*Abstract:* There are pressing needs to evaluate Lake Onego plankton sustainability and to predict its future state in the face of anthropogenic load changes and climate variability observed in the region. To analyze long-term changes in the Onego plankton community, it is necessary to know the range of annual and interannual variability or cyclic and stochastic components. To study the stability of the lake plankton functioning, discrete and continuous approaches were used. On the base of the discrete approach, the phenological phases in the annual cycle were identified; their features, timing and duration were defined; transition periods, which occur due to the thermal regime interannual variability, were revealed. With the use of the continuous approach, a set of models, describing the average plankton state for each day within the growing season, were created. The trajectory, main parameters of the plankton dynamics, the absolute and the relative speed of seasonal processes were calculated. The relations between calculated rates and the lake plankton production parameters were found. The synchronization of the lake plankton elements dynamics with each other and with environmental factors was examined. The high stability of pelagic plankton in Lake Onego was confirmed.

*Keywords:* pelagic plankton, annual cycling, plankton phenology, seasonal dynamics, interannual variability, climate change

## СОВРЕМЕННЫЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ THERMO SCIENTIFIC И CRDS-АНАЛИЗАТОРЫ PICARRO ДЛЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сергей Сергеевич Талисманов  
к.х.н., руководитель направления  
ГК «МС-АНАЛИТИКА»

e-mail: [sergey.talismanov@textronica.com](mailto:sergey.talismanov@textronica.com)

*Аннотация:* рассмотрены современная линейка масс-спектрометров Thermo Scientific для элементного анализа и всех типов изотопного анализа, включая периферийные модули для IRMS, а также изотопные системы и газоанализаторы Picarro. Описаны решаемые ими аналитические задачи в области лимнологии. Приведены общие принципы выбора систем для изотопного анализа.

*Ключевые слова:* масс-спектрометрия, изотопный анализ, изотопы воды, изотопы углерода, элементный анализ, CRDS, газоанализаторы

Современные физико-химические методы анализа играют исключительно важную роль во многих областях, в том числе и в исследованиях внутренних водоемов. Особое место занимает масс-спектрометрия – благодаря многообразию типов масс-спектрометров и, соответственно, методик анализа объектов различной природы. Различные системы обработки и ввода пробы, способы ионизации и типы масс-анализаторов позволяют проводить как изотопный анализ (практически всех элементов периодической системы), так и элементный («неорганический»), а также анализ органических соединений.

Компания Thermo Scientific (в прошлом известная как MAT, Finnigan, Thermo Electron), старейший и авторитетнейший производитель масс-спектрометрического оборудования, является безусловным мировым лидером в этой отрасли. Линейка выпускаемого оборудования простирается от «простых» настольных квадрупольных ГХ-МС до магнитных изотопных ИСП-МС с двойной фокусировкой. В рамках представляемой тематики особый интерес представляют различные модели масс-спектрометров для изотопного и элементного анализа.

MS, масс-спектрометры для анализа легких стабильных изотопов (H, C, N, O, S и ряда других) – MAT253 и Delta V представляют собой основы целых систем изотопного анализа объектов различной природы и сложности: вод разной степени минерализации, карбонатов, ила и осадков, гидробионтов, РНУ, растворенных индивидуальных органических соединений, растений, окаменелостей и др. Они сочетаются с большим рядом периферийных устройств – элементными анализаторами (валовый анализ сгораемых и пиролизуемых объектов, включая воду); карбонатным модулем; устройством изотопного уравнивания воды; газохроматографическим и ВЭЖХ-интерфейсами для изотопного анализа индивидуальных компонентов смесей; преконцентратором редких атмосферных газов; модулем карбонатного ультра-прецизионного анализа для палео-исследований; системой двойного напуска для анализа газов, полученных оффлайн и для специальных приложений. Delta V и MAT253 могут комплектоваться сразу несколькими периферийными модулями в любой комбинации, обеспечивая решение любого круга задач. Опционально с ГХ-интерфейсом может совместно использоваться дополнительный квадрупольный мас спектрометр, что позволяет проводить в едином цикле идентификацию (структурный анализ) индивидуальных органических соединений и измерять их изотопный состав.



*Рис.1. Модульность масс-спектрометрических систем для изотопного анализа.*

В случае, когда перед исследователями (или их консорциумом) стоит широкий круг задач по стабильным изотопам легких элементов – эти масс-спектрометрические системы являются оптимальным решением. Кроме того, они обладают исключительной ремонтпригодностью «на месте» и служат своим пользователям десятилетиями. При этом требуют лабораторных условий и (в большинстве случаев) не могут применяться «в поле».

ИСП-МС ELEMENT 2 и ELEMENT XR не имеют себе равных в элементном «неорганическом» анализе всевозможных объектов в диапазоне от Li до трансурановых элементов. Магнитно-секторный анализатор с двойной фокусировкой, высокое ускоряющее напряжение, высокое «физическое» разрешение определяют высочайшие чувствительность и селективность анализа. Пределы обнаружения в ряде случаев составляют квадриллионные доли (ppq), а большинство изобарных наложений в масс-спектре разрешаются друг от друга. Например, чувствительность приборов позволяет достоверно определить менее килограмма ртути, равномерно распределенной по всему объему озера Байкал!

В сотнях ведущих лабораторий по всему миру прекрасно зарекомендовали себя масс-спектрометры для анализа «тяжелых» изотопов – термоионизационный (TIMS) TRITON Plus и многоколлекторный ИСП-МС (МС-ICP-MS) NEPTUNE Plus, успешно решая задачи изотопной геохимии и геохронологии – от «стандартных» Rb-Sr, U-Pb и Sm-Nd до изотопии железа и хлора. TIMS и МС-ICP-MS в настоящее время не имеют альтернатив для прецизионного измерения изотопных соотношений большинства элементов.

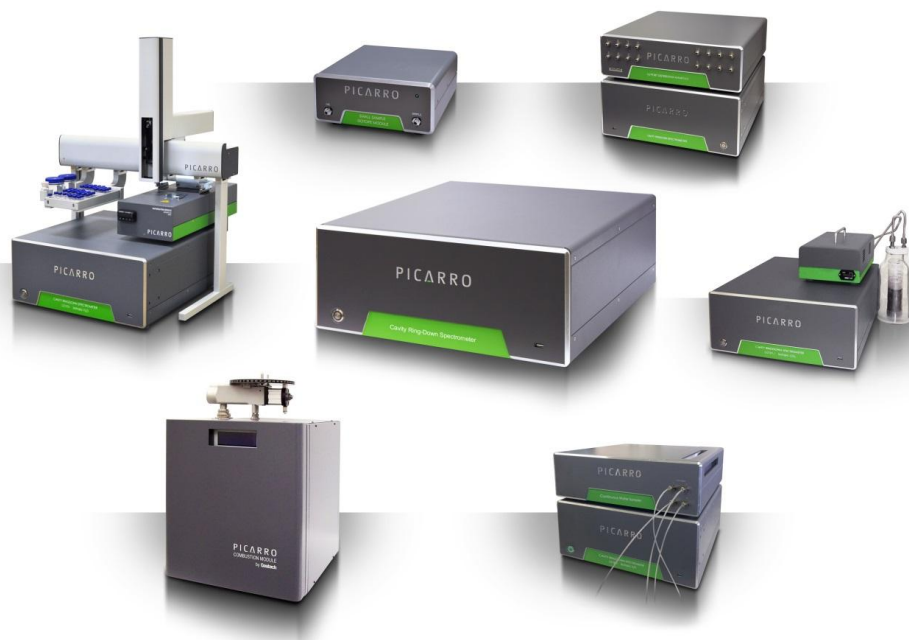
Также особое место занимают масс-спектрометры для изотопного анализа благородных газов – специализированный аргоновый ARGUS 6, гелиевый HELIX SFT, универсальный HELIX MS Plus. Они комплектуются штатными высоковакуумной высокотемпературной печью для термического вскрытия минералов и системой очистки выделяющихся газов. Также они могут комплектоваться системами лазерной абляции различных производителей. Применяются и устройства выделения растворенных благородных газов и криокомпрессоры для разделения разных благородных газов, что бывает особенно актуально для исследований природных вод.

Все больше ведущих исследователей в нашей стране становятся пользователями этих типов приборов, существенно расширяющих возможности исследований.



Инновационная технология CRDS компании Picarro несколько лет назад существенным образом изменила рынок приборов для изотопного анализа и газового анализа и расширила области их применения. Относительно низкая стоимость оборудования, мобильность, простота использования и высокое качество результатов предопределили очень высокий спрос на приборы Picarro и огромное количество пользователей по всему миру, включая Россию.

Анализаторы изотопного состава водорода и кислорода в воде L2130i и L2140i позволяют получить данные с точностью и сходимостью, ранее доступными лишь на IRMS с двойной системой напуска с весьма сложной методикой преобразования пробы и измерения. Анализатор L2140i помимо  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  также измеряет  $\delta^{17}O$  и  $^{17}O$ -excess, что раньше могло осуществлять лишь ограниченное число лабораторий в мире очень трудоемким и сложным способом. Обе модели анализаторов работают не только с жидкой водой, но и с водяным паром. Для измерений в жидкой воде не требуется пробоподготовки, даже для образцов воды с высокой и очень высокой степенью минерализации (до 300-350 г/л). Кроме того, имеется целый ряд периферийных модулей для измерения изотопов воды в образцах различной природы и в различных режимах – автодозатор; сэмплер непрерывного ввода жидкой воды из любых источников; индукционный модуль (извлечение матрично-связанной воды из осадков, растений и проч.), модуль микропиролиза органики, содержащейся в воде; калибратор при измерениях в водяном паре и другие устройства.



*Рис.2. Изотопные системы и анализаторы Picarro.*

Очень широки возможности оборудования Picarro для изотопного анализа углерода: модели G2131i, G2132i и G2201i измеряют  $\delta^{13}C$  в  $CO_2$ , метане и в обоих газах соответственно, а также концентрации  $CO_2$ , метана и водяного пара. Анализатор G2182i измеряет одновременно  $\delta^{13}C$  и  $\delta D$  в метане и концентрацию метана. Прибор G2210i является уникальным решением для обнаружения утечек природного газа – благодаря сочетанию одновременно измеряемых параметров -  $\delta^{13}C$  в метане, концентраций метана, этана и  $CO_2$ . На основе анализаторов G2121i и G2201i создан целый ряд систем  $\delta^{13}C$ -анализа различных объектов: карбонатов; растворенного углерода; малых дискретных образцов газов (в том числе и headspace анализ). Есть системы валового анализа (с модулем сжигания), а также газохроматографический интерфейс для разделения низших углеводородов с их последующим покомпонентным изотопным анализом. Отдельно стоит отметить систему CM-CRDS для измерения  $\delta^{13}C$  в твердых и жидких образцах – простую в использовании, дешевую в эксплуатации и не требующую лабораторных условий. Также i- $CO_2$  приборы сочетаются с полноценными элементными анализаторами (в частности – ECS 4010) с измерением  $\delta^{13}C$  в едином цикле с CHNS-O составом образца.

В случаях, когда у исследователей относительно узкий круг изотопных задач и/или требуется применение оборудования в «полевых» (включая суда и воздушные суда) условиях, оправдано и оптимально использование CRDS-анализаторов и их комбинаций.

Газоанализаторы Picarro измеряют с высокой точностью и сходимостью результатов все парниковые газы и их комбинации; есть ряд специальных моделей для Eddie Covariance и для исследования почвенного дыхания. Многие анализаторы коммутируются с различными типами камер и мультиплексоров; анемометрами и метеостанциями, различными типами дополнительных датчиков.

Линейка анализаторов вредных и промышленных газов включает анализаторы  $\text{NH}_3$ ;  $\text{HF}$ ;  $\text{HCl}$ ;  $\text{H}_2\text{CO}$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4$ ;  $\text{CH}_4+\text{H}_2\text{S}$ ;  $\text{CH}_4+\text{C}_2\text{H}_2$ .

Для всех «газовых» приборов, включая изотопные углеродные, существует штатный 16-портовый мультиплексор, а также системы замкнутого цикла (включая мультиплексирование).

Ряд анализаторов может комплектоваться камерами (почвенными, донными и пр.) в том числе и с различными системами мультиплексирования, а также эквипаторами для выделения и измерения растворенных и содержащихся в осадках (породах) газов – их изотопного состава и/или концентрации.

Большинство анализаторов серий G – как изотопных, так и концентрационных – не требуют расходных материалов и газов-носителей. Системы анализа твердых (жидких) образцов, так же, как и анализаторы изотопного состава воды, в качестве газа-носителя используют азот, который существенно дешевле гелия.

Все без исключения приборы Picarro работают не только в лабораторных, но и в полевых условиях и выдерживают весьма суровые условия эксплуатации. Их электропитание осуществляется как от сети переменного тока, так и от источников постоянного тока – они совместимы с различными типами АКБ и инвертеров.

## **MODERN THERMO SCIENTIFIC MASS-SPECTROMETERS AND PICARRO CRDS-ANALYZERS FOR LIMNOLOGICAL RESEARCH**

Sergey Sergeyevich Talismanov

Ph.D., line supervisor

MS-ANALYTICA GoC

E-mail: [sergey.talismanov@textronica.com](mailto:sergey.talismanov@textronica.com)

*Abstract:* recent lines of Thermo Scientific mass-spectrometer systems for elemental analysis and all types of isotope analysis (including IRMS peripherals) along with Picarro isotope systems and gas analyzers are reviewed. Their limnological applications are described. Isotope analysis system basic selection principles are given.

*Keywords:* mass-spectrometry, isotope analysis, water isotopes, carbon isotopes, elemental analysis, CRDS, gas analyzers

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО  
ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОД ОЗЕРА ХУБСУГУЛ (МОНГОЛИЯ)  
В 1959-2011.**

Евгения Николаевна Тарасова,  
к.х.н, старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
E-mail: [tarasova@igc.irk.ru](mailto:tarasova@igc.irk.ru)

Елена Анатольевна Мамонтова,  
к.м.н, старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [elenam@igc.irk.ru](mailto:elenam@igc.irk.ru)

Александр Анатольевич Мамонтов,  
к.б.н, старший научный сотрудник  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
E-mail: [mamontov@igc.irk.ru](mailto:mamontov@igc.irk.ru)

Аркадий Владимирович Горегляд,  
к.г.-м.н., главный специалист  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [agor@igc.irk.ru](mailto:agor@igc.irk.ru)

Лилия Леонидовна Ткаченко,  
ведущий инженер  
ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
E-mail: [lili@igc.irk.ru](mailto:lili@igc.irk.ru)

*Аннотация:* Представлены результаты исследования горизонтального и вертикального распределения компонентов трофического статуса вод озера Хубсугул. Впервые проведено исследование сезонных изменений взвеси, хлорофилла-а, кремния, органического углерода, минеральных и органических форм азота и фосфора в водах озера.

*Ключевые слова:* озеро Хубсугул, взвесь, углерод, азот, фосфор

Хубсугул – самое глубокое озеро в Монголии расположено на высоте 1645 м над уровнем моря и 1118 м над уровнем Байкала. Площадь водной поверхности 2760 кв. км, длина 136 км, ширина 36.5 км, максимальная глубина 262.2 м, средняя – 138 м, объем 383 куб. км и составляет 0.7% всей пресной воды мира. Водосборная площадь 4920 кв. км, около 90 рек и притоков впадает в озеро [1,2]. Озеро имеет сток через реку Эгин-гол в Селенгу, которая является притоком Байкала.

В геологическом строении района участвуют отложения различных геологических эпох: от архея до современных. В южной части района наиболее распространены архейские породы, сложенные разнообразными гнейсами, сланцами, кварцитом и кристаллическим известняком. На севере, северо-западе и северо-востоке распространены базальты, граниты и гнейсы [3].

Озеро покрывается льдом в конце ноября – начале декабря, вскрывается в конце мая – начале июня. Прогревание воды в летний период происходит медленно, достигая максимальной величины +15°C в конце июля-августа. С глубиной температура воды падает и на горизонте 100 м достигает 3.9–4.1°C.

По результатам исследований экспедиций Иркутского и Монгольского университетов с 1959 г. было проведено большое количество конференций и издано ряд их трудов, как в виде тезисов, так и монографии [1,3].

Органическое вещество (ОВ) по косвенным показателям (перманганатной и бихроматной окисляемостям) и минеральные биогенные элементы в 1960-70-х годах были определены в летне-

осенний период года [3]. Их содержание, указывают авторы, не испытывает больших изменений ни по годам, ни по акватории озера. К такому же выводу приходят и гидробиологи по распределению численности фитопланктона [3]. Фрагментарны также исследования Urabe J. et al [4] по некоторым гидрохимическим характеристикам, проведенные 2 июля 1997 г. сразу после вскрытия озера ото льда и 18 июля 1998 г. после 3-х недель после вскрытия. В 2001-2002 гг. исследования автотрофного пикопланктона также проводили в марте-апреле и июле-августе [5].

Цель данного сообщения – оценить современное состояние трофического статуса вод озера Хубсугул. В задачи исследования входит: - изучение горизонтального и вертикального распределения взвеси, хлорофилла-а, кремния, углерода, минеральных и органических форм азота и фосфора; - определение сезонных изменений содержания компонентов трофического состава вод озера; - на основе стехиометрического соотношения C:N:P рассмотреть лимитирующий фактор развития планктонных организмов и трофический индекс озера.

Материалом для данного сообщения по распределению компонентов трофического состава послужили пробы воды, отобранные в конце июля – начале августа 1990 г. на 9-ти разрезах, на каждом из которых пробы отбирались на 3-х станциях: в 3-км от западного и восточного берегов и на середине разреза. Отбор проб воды производился с поверхности и с разных горизонтов. О сезонных изменениях судили при ежемесячном отборе проб воды с поверхности на станции в 7–8 км от берега у пос. Ханх (глубина около 50 м).

Анализы химических компонентов были проведены с использованием стандартных гидрогеохимических методов, изложенных в ряде руководств [6,7].

Горизонтальное и вертикальное распределение компонентов трофического статуса вод Хубсугула.

Цветность вод озера Хубсугул по платиново-кобальтовой шкале низкая и составляет 0-5°. В них, как правило, как и в 1960 годах и 1970-х [3,8] отсутствуют нитритный и аммонийный азот. Концентрация нитратного азота колеблется в пределах 5–15 мкгN/л (рис.1). Общее количество взвеси изменяется от 0.30 до 11.7 мг/л. Область вод величин содержания взвешенных веществ выше 5 мг/л приходится на северную часть озера и глубоководную часть юга озера. Аналогичная картина наблюдается для распределения Сорг., содержание которого в нефилтрованной воде изменяется от 0.71 до 4.1 мг/л, во взвеси – 0.06-0.29 мг/л. Близко к распределению Сорг. и концентрация хлорофилла-а, низкие их величины – 0.1–1.17 мкг/л - характерны для олиготрофных вод [9-12]. Si-SiO<sub>2</sub> колеблется в пределах 0.48–2.53 мг/л. Норг. изменяется в пределах 77–328 мкгN/л. P мин. выше 5 мкгP/л найден на севере озера. В 1950-х и 1970-х годах содержание P мин. было несколько выше [3,8].

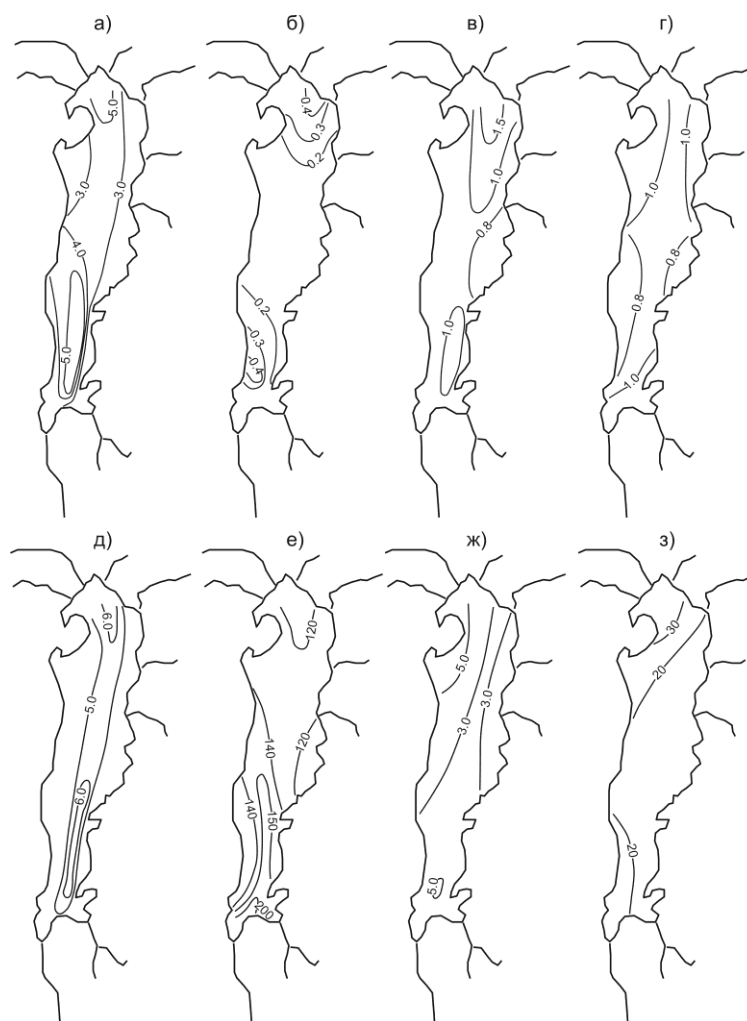


Рис. 1. Горизонтальное распределение в толще вод оз. Хубсугул в июле-августе 1990 г. (а – взвесь, мг/л; б – хлорофилл-а, мкг/л; в –  $C_{орг}$ ; г – кремний, мг/л; д – нитратный азот, мкгN/л; е –  $N_{орг}$ , мкгN/л; ж –  $P_{мин}$ , мкгP/л; з –  $P_{общий}$ , мкгP/л.

Робщ. свыше 20 мкг/л приходится на север и юг озера. Величины атомных отношений С:N, С:P, N:P изменялись в пределах 3–44, 78–1328 и 8.6–51.3, соответственно. Процент азота и фосфора в ОВ составляет 3-12 и 0.1–1.49, соответственно.

По вертикали содержание  $N_{мин}$  и  $P_{мин}$  увеличивается, а органических их форм понижается, что, несомненно, связано с минерализацией ОВ планктонных организмов. О понижении развития планктонных организмов можно судить о снижении концентрации хлорофилла-а. Повышение содержания кремния с глубиной может также свидетельствовать о том, что происходит развитие водорослей. Величины атомных отношений С:N, С:P, N:P повышаются по вертикали.

Сезонная изменчивость компонентов трофического статуса вод Хубсугула. В течении года для всех исследуемых компонентов наблюдаются изменения в их содержании:  $C_{орг}$  – от 0.75 мг/л в декабре до 1.18 мг/л в июле, взвесь – 0.15–2.3 мг/л, кремний – 0.66 мг/л в апреле до 1.31 в декабре, минеральный фосфор (2–6 мкг/л) значительно ниже органических форм (4–27 мкг/л), из минеральных форм азота присутствуют все формы азота (аммонийный – 6–30 мкг/л, нитритный – 0.1–2.6 мкг/л, нитратный – 5–11 мкг/л), органический азот – от 17 мкг/л зимой в декабре до 258 мкг/л в августе (рис.2).

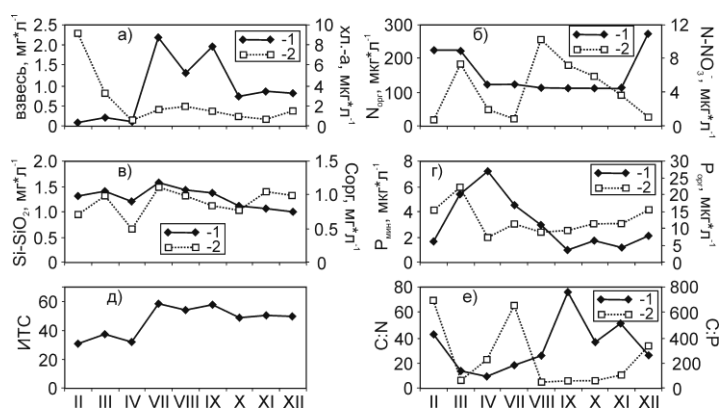


Рис. 2. Сезонные изменения содержания компонентов трофического статуса в оз. Хубсугул (а: 1 – хлорофилл-а, 2 – взвесь; б: 1 –  $N-NO_3^-$ , 2 –  $N_{орг}$ ; в: 1 –  $C_{орг}$ , 2 –  $Si-SiO_2$ ; г: 1 –  $P_{орг}$ , 2 –  $P_{мин}$ ; д – индекс трофического статуса (ИТС); е: 1 – C:P, 2 – C:N).

Следует отметить, что в 1990 г. нами не было найдено ни аммонийного, ни нитритного азота. Это, возможно, связано, с одной стороны, с глобальным потеплением климата, что ведет к таянию мерзлоты, с другой стороны, с антропогенными факторами (туризм, перевыпас на пастбищах). Действительно, анализ данных дешифрирования космических снимков высокого разрешения за 3 временных периода (1992–2000–2008 гг.) [13] показал, что площадь озера в последние годы увеличилась: в 1992–2000 гг. - на 50.4 км<sup>2</sup>, в 1992–2008 гг. – на 59.8 км<sup>2</sup>. Среднегодовая температура по станции Хатгал за последние 43 года увеличилась на 1.7°C, в том числе зимой на 3.1°, весной – на 2.1°, летом – на 1.4°, осенью – на 0.9°C. Глубина протаивания мерзлоты зависит также и от численности скота, которая на территории парка увеличилась в два раза [13]. Кроме того, в Хубсугульском национальном парке, организованном в 1992 г., расположено 50 туристических баз, немаловажную долю в загрязнении озера вносят аварийные ситуации, связанные с транспортировкой нефтепродуктов через озеро [14]. Наконец, нахождение стойких органических загрязнителей (СОЗ) в донных отложениях, зоопланктоне озера и в атмосфере, несомненно, является показателем антропогенного влияния [15-17].

Краткий временный весенний максимум ОБ и минимум минеральных форм азота и фосфора отмечен в марте, затем минимум содержания ОБ в июле. Начиная с августа по октябрь наблюдаем более продолжительный максимум содержания ОБ, согласно повышенному содержанию хлорофилла-а и  $N_{орг}$ . можно предполагать, что преобладает развитие сине-зеленых водорослей осенью, а весной доминирует также и диатомовый фитопланктон. Концентрации нитратного азота и минерального фосфора с апреля по ноябрь понижаются. Для Байкала характерен продолжительный весенний минимум минерального фосфора (март-июнь) и кремния и более кратковременный минимум нитратного азота в сентябре [11,12].

Таблица 1  
Сезонные изменения величин биогеохимических параметров в поверхностных водах Хубсугула в 2011 г.

месяц	N:P по весу	N:C по весу	P:C по весу
февраль	2.75	0.017	0.006
март	4.2	0.18	0.019
апрель	1.7	0.051	0.03
июль	1.25	0.018	0.014
август	23	0.24	0.01
сентябрь	51	0.17	0.003
октябрь	24	0.17	0.007
ноябрь	22	0.11	0.005
декабрь	3.5	0.036	0.01

Следует отметить, что в 1970-гг. по данным Кожовой О.М. и Загоренко Г.Ф. [3] доминирующими формами фитопланктона в озере Хубсугул были *Cyclotella Ocellata* и *Oocystis mongolica*, при этом не существует различий в их количестве ни по акватории, ни по годам, кроме того, отмечают авторы, отсутствуют синезеленые водоросли. В марте и июле 2001 г., в марте и августе 2002 г. Белых О.И. и Сороковикова Е.Г. обнаружили массовое развитие автотрофного пикопланктона [5].

Стехиометрическое отношение Редфильда C:N:P = 41:7.2:1 (по весу) широко цитируемая величина, используемая для оценки биогенного лимитирования развития фитопланктона [19–22]. Forsberg and Ryding (1980) [10] сообщили, что величина отношения N:P меньше 5 по весу означает N-лимитацию, отношение больше 12 также включало P-лимитацию. Согласно нашим данным лимитирование по азоту в течение года в водах озера Хубсугул наблюдаем зимой и весной; летом и осенью найдена P-лимитация. Healey and Hendzel (1980) [20] использовали отношение N:C (меньше 0.13 по весу – N-лимитация), P:C (меньше, чем 0.02 – P-лимитация). В исследуемый период нами обнаружена P-лимитация в течение почти всего года, кроме апреля месяца, когда величина P:C достигала 0.03. Величина отношения N:C меньше 0.13 по весу приходится на февраль, март-апрель, ноябрь-декабрь. Таким образом, как нами было показано ранее [23–25], развитие фитопланктона лимитирует как фосфор, так и азот.

Обращает на себя внимание то, что достаточно низкому количеству взвеси соответствует относительно высокое содержание хлорофилла-а и кремния в августе–октябре, что, вероятно, связано с развитием мелких форм планктонных организмов.

Содержание хлорофилла как показателя биомассы фитопланктона и отражающий трофический статус водоемов было использовано в виде индекса трофического состояния – ИТС [22,26].

Значения ИТС менее 40 составляют олиготрофные воды, 40–60 – мезотрофные и более 60 – эвтрофные при концентрации хлорофилла менее 1, 1–10 и более 10. ИТС меньше 40 приходится на январь-апрель, в остальные месяцы он составляет 49–59. Таким образом, большую часть года в исследуемый период воды Хубсугула можно отнести к мезотрофному типу.

#### **Заключение.**

Проведены исследования пространственного распределения и временной изменчивости компонентов трофического статуса вод озера Хубсугул. Получено:

- появление аммонийного и нитритного азота, повышение органического углерода, азота и фосфора свидетельствует об изменении гидрохимических характеристик вод озера Хубсугул, как под воздействием природных явлений (глобальное потепление), так и антропогенных факторов (туризм, перевыпас на пастбищах, атмосферного переноса).

- Впервые проведено исследование сезонных изменений взвеси, хлорофилла-а, кремния, органического углерода, минеральных и органических форм азота и фосфора в водах озера. Отмечены два максимума органического вещества и минимума минеральных форм азота и фосфора весной в марте и осенью, Причем весенний максимум кратковременный, а осенний более продолжительный с августа по октябрь. Согласно уровню содержания компонентов трофического статуса и величин их отношений, можно сделать вывод, что доминируют разные виды водорослей.

- На основе стехиометрического отношения C:N:P подтверждено, что лимитирующими компонентами в развитии фитопланктона являются и азот, и фосфор [23].

- Согласно индексу трофического состояния ИТС воды озера Хубсугул с января по апрель относятся к олиготрофному типу, в остальное время года – к мезотрофному.

#### Литература:

1. Атлас озера Хубсугул. Под ред. Б.А.Богоявленский. – ГУК. М., 1989. – 117 с.
2. Лимнология и палеолимнология Монголии. Биологические ресурсы и природные условия Монголии. Тр. Совместной российско-монгольской экспедиции. Том 60. – М., 2014. – 363 с.
3. Природные условия и ресурсы Прихубсугуля в МНР/ гл. ред. Н.Ф. Лосев и Н. Содном. – М.: Недра, 1976. – 354 с.
4. Urabe J., Sekino T., Hayami Y., Maruo M., Tsujimura Sh., Kumagai M., Boldgiv B., Goulden C.E. Some biological and chemical characteristics of Lake Hovsgol / The geology, biodiversity and ecology of Lake Hovsgol. Eds. C.E. Goulden, T. Sitnikova, J. Gelhaus, B. Boldgiv. Backhuys Publishers, Leiden. 2006. –P. 387-402.
5. Belykh O. I., Sorokovikova E. G., Tikhonova I. V. and Fedotov A.F. Abundance, morphological diversity and spatial distribution of autotrophic picoplankton in Lake Hovsgol (Mongolia) // Aquatic Ecosystem Health and Management . – 2005. – Vol. 8(4). – P. 461-473.
6. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.Ф. Воробьевой. – М.: GEOS, 2006. – 400 с.
7. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / Под ред. Л.В. Боевой. – Ростов–на–Дону: Изд-во «ОК», 2009. – 1044 с.
8. Бочкарев П. Ф., Николаева М. Д., Самарина А.В. Гидрохимическая характеристика озера Хубсугул // Известия физ.-хим. НИИ при ИГУ. – 1959. - Т. VI, вып. 1. – С. 40-52.
9. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр, 2007. – 395 с.
10. Forsberg C., Ryding S. O. Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste-receiving lakes // Arch. Hydrobiol. – 1980. – Vol. 89. – P. 180-207.
11. Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Kuzmin M. I. Some parameters of the state of the Lake Baikal ecosystem inferred from long-term observation // Doklady Earth Sciences. – 2006. – Vol. 409A. – №. 6. – P. 973-977.
12. Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Kerber E. V. Seasonal and interannual variations of water chemistry in the headwater streams of the Angara River (Baikal) from 1950 to 2010 // Geochemistry International. – 2014. – Vol. 52, Is. 7. – P. 523-532.
13. Оюунгэрэл Б. Отражение глобального потепления в изменении озера Хубсугул // Вестник Бурятского Государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 190-192.
14. Аргучинцев В. Л., Аргучинцева А. В. Численное моделирование течений и переноса примесей в оз. Хубсугул // Изв. Ирк. Гос. ун-та серия Наука о земле. – 2014. – Т. 7. – С. 2-13.
15. Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Горегляд А. В., Ткаченко Л. Л., Мамонтов А. А., Кузьмин М. И. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в атмосферном воздухе северного Прихубсугуля в 2008-2013 гг // ДАН. – 2015. – Т. 464. – № 5. – С. 608-610
16. Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Горегляд А. В., Ткаченко Л. Л., Мамонтов А. А. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе в северном Прихубсугулье // В сб.: Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 186-187
17. Mamontova E. A., Tarasova E. N., Ganchimeg D., Kuzmin M. I., Mamontov A. A., Khomutova M. Yu., Burmaa G., Odontuya G., Erdenebayasgalan G. Persistent organic pollutants (PCBs and OCP) in air and soil from Ulaanbaatar and the Lake Hovsgol region, Mongolia // Mongolian Journal of Chemistry. – 2011. – № 12 (38). – P. 69-77.
18. Goulden C. E., Tumurtogoo O., Karabanov E. Mongontsetseg A. The Geological history and Geography of Lake Hovsgol / in The geology, biodiversity and ecology of Lake Hovsgol. Eds. C. E. Goulden, T. Sitnikova, J. Gelhaus, B. Boldgiv. Backhuys Publishers, Leiden, 2006. – P. 1-17.
19. Mitamura O., Khadbaatar D., Ishida N. Comparative investigation of chemical and biological characteristics in waters and trophic state of Mongolian lakes // Limnology. – 2010. – Vol. 11. – P. 17-30.
20. Healey F. P., Hendzel L. L. Physiological indicators of nutrient deficiency in lake phytoplankton // Can J Fish Aquat Sci. – 1980. - Vol. 37. – P. 442-453.



21. Kilham S. S. Relationship of phytoplankton and nutrients to stoichiometric measures / In: Large lakes. Ecological structure and function. M.M. Tilzer, C. Serruya (eds.). – Springer-Verlag, 1990. – P. 403-413.
22. Hecky R. E., Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effect of enrichment // *Limnol. Oceanogr.* – 1988. – Vol. 33. P. 796-823.
23. Тарасова Е. Н. Компоненты трофического статуса в водах Байкала, Хубсугула и Телецкого // *Сибирский экологический журнал.* – 1998. – № 5. – С. 383-390.
24. Тарасова Е. Н., Стальмакова В. Н., Шпейзер Г. М. О биогенной лимитации роста фитопланктона в оз.Хубсугул // В сб. *Природные условия, история и культура западной Монголии и сопредельных регионов.* – Томск, 1999. – С. 121-122.
25. Tarasova E. N., Kuzmin M. I., Gvozdkov A. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Khomutova M. U. and Chernyaeva G. P. The Suspended and Dissolved Forms of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Lakes Baikal and Hovsgol (Snow-Tributaries-Water-Sediments) // «Long Continental Records from Lake Baikal» Ed. K.Kashiwaya, Springer-Verlag, 2003. – P. 329-347.
26. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography.* – 1977. – Vol. 22(2). – P. 361-369.

#### **THE DISTRIBUTION AND TIME VARIATION OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN WATER OF THE LAKE HOVSGOL (MONGOLIA) IN 1959-2011.**

Eugenia Nikolaevna Tarasova,  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [tarasova@igc.irk.ru](mailto:tarasova@igc.irk.ru)

Elena Anatolievna Mamontova,  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [elenam@igc.irk.ru](mailto:elenam@igc.irk.ru)

Alexander Anatolievich Mamontov,  
Ph.D, senior research worker  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [mamontov@igc.irk.ru](mailto:mamontov@igc.irk.ru)

Arkadiy Vladimirovich Goreglyad,  
Ph.D, leading specialist  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [agor@igc.irk.ru](mailto:agor@igc.irk.ru)

Lilia Leonidovna Tkachenko,  
principal engineer  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
E-mail: [lili@igc.irk.ru](mailto:lili@igc.irk.ru)

*Annotation:* The results of the investigation of the horizontal and vertical distribution of nutrients in water of the Lake Hovsgol are presented. The investigation of seasonal variations of suspended matter, chlorophyll-a, Si, organic carbon, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus in lakes water was firstly carry out.

*Key words:* Lake Hovsgol, suspended matter, carbon, nitrogen, phosphorus

**К ПРОБЛЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА  
В ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ  
СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

Антон Викторович Терехов,  
инженер  
лаборатории географии и природопользования ИНОЗ РАН  
E-mail: [a.terehov@spbu.ru](mailto:a.terehov@spbu.ru)  
Татьяна Валентиновна Сапелко  
старший научный сотрудник  
лаборатории географии и природопользования ИНОЗ РАН  
E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Аннотация:* В исследованиях группы палеолимнологии ИНОЗ РАН периодически возникают задачи, связанные с необходимостью картографических представлений палеогеографических реконструкций на основе имеющихся данных, например, об изменении уровня водоемов. На примере среднemasштабной палеорекопструкции изменения уровня Ладоги в её северной части за последние 3000 лет назад, предлагается методика реконструкции и дается оценка её погрешности. Описывается методика выбора подходящей цифровой модели рельефа для осуществления геоинформационного картографирования.

*Ключевые слова:* палеолимнология, цифровые модели рельефа, гляциоизостатическое поднятие, ГИС, палеогеографическая реконструкция, изменения уровня озер

В исследованиях группы палеолимнологии ИНОЗ РАН периодически возникают задачи, связанные с необходимостью картографических представлений палеогеографических реконструкций на основе имеющихся данных. В основном, это исследования, касающиеся изменения относительного уровня водоёмов, для которых, во-первых, необходимо иллюстрировать в картографической форме полученные результаты для понимания пространственных масштабов этих изменений, а, во-вторых, для будущих работ нужно проводить поиск озёр, которые потенциально могли в тот или иной период времени быть «затопленными» водами более крупных водоёмов, а, значит, могут иметь наиболее «информативные» колонки донных отложений.

Одну из таких задач можно сформулировать следующим образом: имеются колонки донных отложений порядка десяти озер в северной части Ладожского бассейна и на крупных островах озера Валаам и Путсаари (Рис. 1). В этих колонках установлен период их обособления от более крупного водного тела – Ладожского озера, который помимо биостратиграфии датирован методом радиоуглеродного анализа [3;4;5;16]. В основном, датировки относятся ко времени после 3100 лет назад, т. е. к периоду сразу после завершения Ладожской трансгрессии и образования р. Невы, когда уровень Ладоги стал понижаться, что и приводило к последовательной изоляции озер.

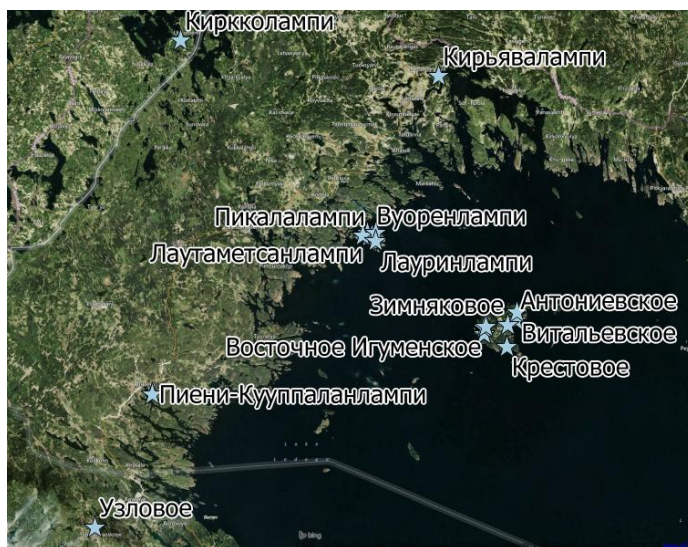


Рис. 1. Озера с имеющимися по ним палеогеографическими данными с датировками. Снимки Bing.

Благодаря тому, что озера расположены на различных высотах и изолированы в разное время, удалось построить график изменения уровня Ладожского озера за некоторый период времени (Рис. 2) для последующего картографирования. Однако рассматриваемая территория подвергалась и подвергается изостатическому поднятию, следовательно, подход, при котором можно было бы «залить водой» средствами ГИС привязанную топографическую карту до нужной горизонтали (на которой располагается озеро в момент обособления), представляется неверным, т.к. несмотря на то, что территория в целом была ниже, чем сейчас, поднятие происходило неравномерно. По палеогеографическим и геофизическим данным, скорость поднятия к северо-западу выше, чем к юго-востоку [7], поэтому горизонтали в течение времени меняли форму, и их невозможно скорректировать, просто поменяв значение высоты для каждой из них.

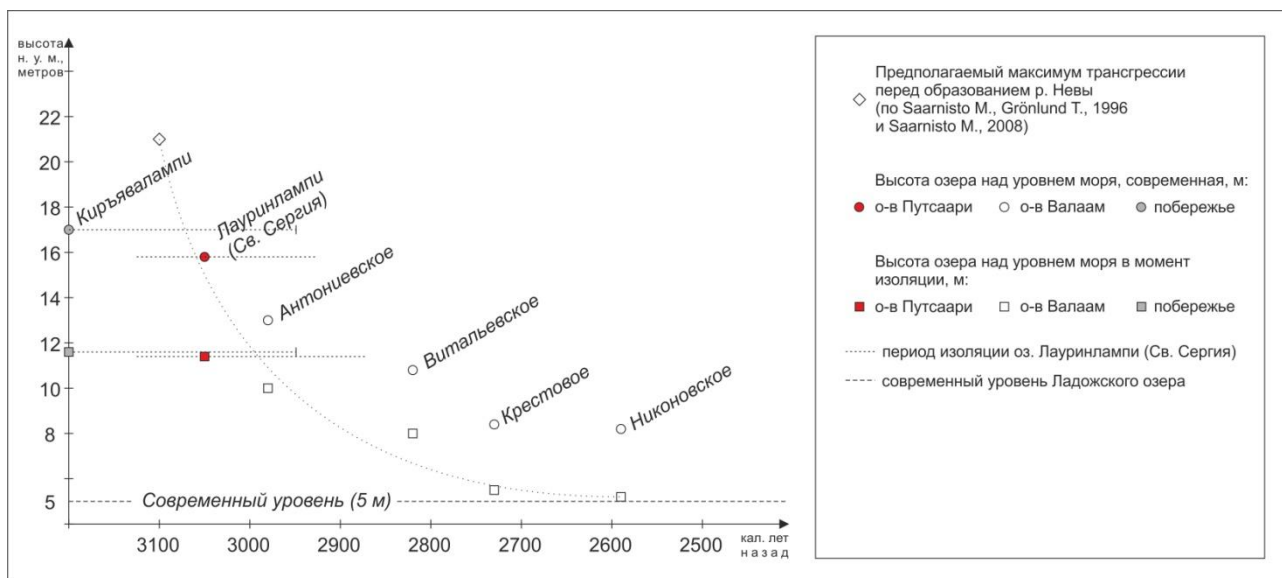


Рис. 2. График обособления малых озёр на севере Ладожского озера в период после 3100 лет.

В подобном контексте и в данном масштабе для палеогеографических реконструкций геоинформационный подход применялся Аларом Розентау для стадий развития Балтийского моря [14,15]. Подход предполагает наличие двух цифровых поверхностей: первая – цифровая модель современного рельефа, вторая – поверхность палеоуровня водоёма, полученная интерполяцией методом кригинга высотных отметок стояния уровня воды в определенный период времени. Из-за

неравномерного изостатического поднятия эта поверхность палеоуровня будет, в общем, иметь вид наклонной плоскости. Цифровая модель современного рельефа должна быть предварительно скорректирована по картам четвертичных образований с мощностью накопленных осадков, после чего из нее вычитается поверхность палеоуровня (или поверхности на разные моменты времени), в результате чего отметки стояния уровня воды оказываются на уровне современного нуля.

Однако для описываемой задачи с озерами подобный подход трудно применим: на каждый из моментов времени, для которых необходимо получить карту уровня, иногда приходится по одному - два озера, следовательно, для проведения интерполяции поверхности воды недостаточно данных. А потому, «перекос» поверхности уровня вследствие изостатических движений необходимо вычислить другим образом. Для этого можно, зная скорость современного поднятия, умножить её на количество прошедших лет, тем самым, приняв её за постоянную, что неверно. Однако вследствие относительно небольшого рассматриваемого промежутка — 3 тысячи лет, такой подход даёт малую ошибку в первые метры (причем, всегда в сторону уменьшения величины поднятия), что будет сравнимо с вертикальной точностью модели рельефа, и, потому, приемлемо. Для данной работы выбрана схема современных скоростей гляциоизостатического поднятия [11] для территории Фенноскандии (Рис. 3), по которой современный рельеф рассматриваемой территории предлагается скорректировать за счет изостази.

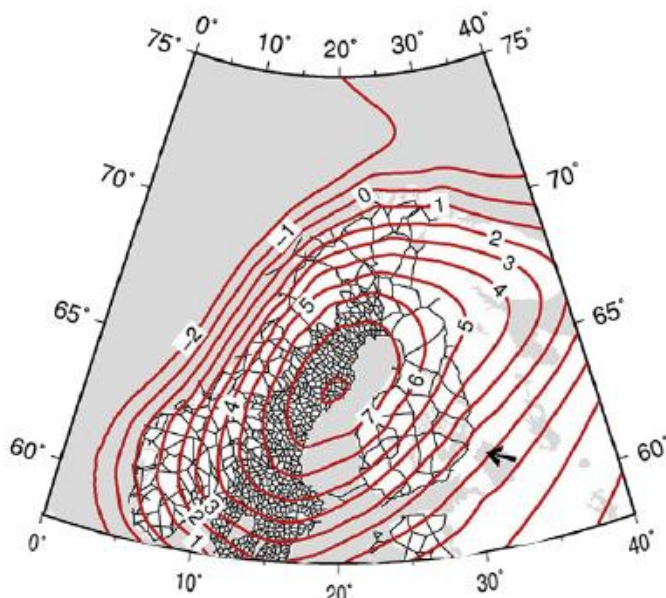
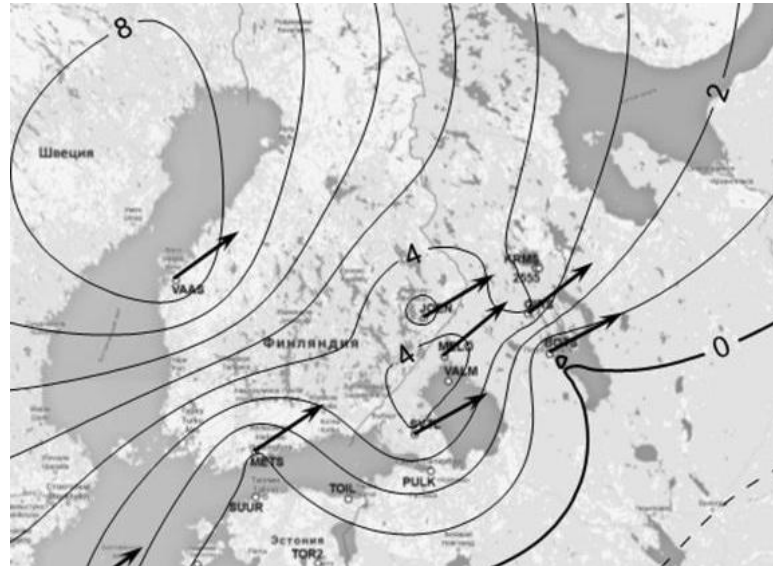


Рис. 3. Схема изобаз современного гляциоизостатического поднятия на территории Фенноскандии (по [11]). Стрелкой показан о. Валаам.

Необходимо отметить, что точная оценка погрешности коррекции рельефа за счет изостатического поднятия остается открытой, так как существуют иные, довольно сильно отличающиеся оценки современных скоростей поднятия [1; 2]. Эти оценки основаны на постоянных многолетних ГНСС-наблюдениях и превышают значения, указанные на рис. 4 [11]. На рисунке видно, что южнее о. Валаам проходит изобаза +4 мм/год. Таким образом, наша оценка суммарного поднятия территории за последние 3000 лет может быть занижена еще больше.



*Рис. 4. Карта скоростей вертикальных и горизонтальных движений за период 2006-2013 гг. в ITRF 2008; изолинии скоростей вертикальных движений проведены через 1мм/год [2].*

Однако для решаемой задачи палеореконокструкций на севере Ладожского озера вопрос оценки величины изостатического поднятия не является единственной трудностью – встает также вопрос выбора исходной цифровой модели рельефа для палеореконокструкций. Все цифровые модели можно условно разделить по способу их получения на три большие группы: созданные по данным наземной съемки, полученные по имеющимся топографическим картам и основанные на использовании методов дистанционного зондирования Земли (аэро- или космической съемки) [10]. Применить методы наземной съемки (тахеометрической или наземного лазерного сканирования) для данной задачи нецелесообразно вследствие размера рассматриваемой территории; аэрофотосъемка (фотографическая или лидарная) не подходит вследствие своей дороговизны; остаются два пути: использовать свободно распространяемые и бесплатные модели, полученные космическими аппаратами, либо самостоятельно производить векторизацию топографических карт с последующим получением цифровых моделей рельефа.

Две наилучших в настоящее время по пространственному разрешению бесплатно распространяемых ЦМР – это SRTM с разрешением 3 угловые секунды на пиксель и ASTER с разрешением 1 угловая секунда на пиксель, что для широты рассматриваемой местности примерно соответствует линейному размеру ячейки 90x45 м и примерно 30x15 м, соответственно. Остальные ЦМР сильно уступают по этому параметру, например, GTOPO30 имеет пространственное разрешение 30 угловых секунд. Однако ЦМР SRTM покрывает только территории южнее 60-го градуса северной широты и может применяться только для южного побережья Ладоги. Следовательно, единственным вариантом из «готовых» моделей остается только ЦМР ASTER. По общему для моделей рельефа правилу [8], размер ячейки ЦМР должен приблизительно равняться 0,5 мм на карте, из чего следует, что масштаб карт, составленных по ASTER, может составлять до 1:25000, что вполне удовлетворяет нуждам нашего исследования. Помимо горизонтального разрешения модели, существуют еще два формальных критерия: вертикальное разрешение модели (дискретность отображения высот) и её вертикальная точность (ниже дискретности). Вертикальное разрешение ASTER составляет 1 м, а наилучшая точность (среднеквадратическая ошибка) – 7 метров [9].

Чтобы понять, соответствует ли такая вертикальная точность модели нуждам данной реконструкции, необходимо вернуться к оценке размера гляциоизостатического поднятия за рассматриваемый период времени (3 тысячи лет назад), а также амплитуду колебаний уровня Ладоги за это время. Как было сказано выше (Рис. 4), через о. Валаам проходит изобазы

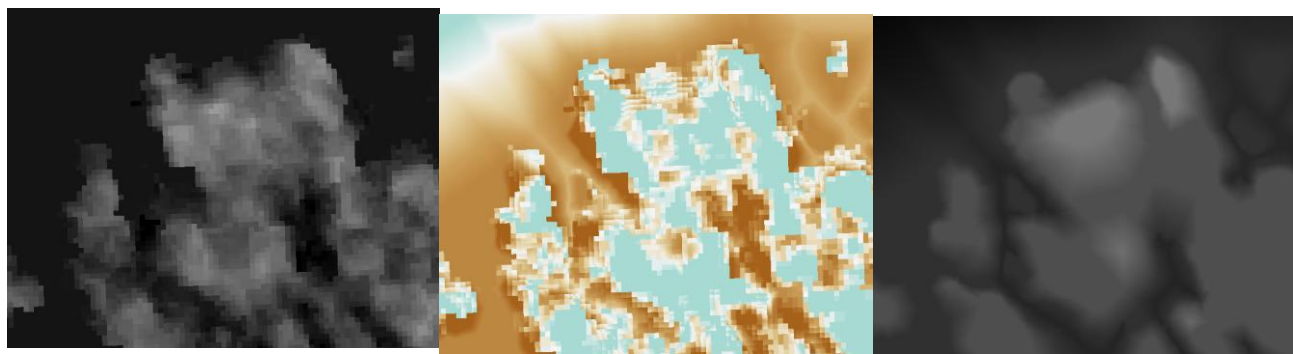


современного поднятия со скоростью 1 мм/год. Умножение этой скорости на три тысячи лет позволяет получить грубую оценку снизу (так как в действительности скорость поднятия убывает во времени) для величины поднятия за этот период в 3 метра. Следы максимума ладожской трансгрессии на севере Ладожского озера наблюдаются на современных отметках 21 м над уровнем моря [16] при сегодняшнем уровне уреза Ладоги примерно 5 м.

Помимо прочего, у ASTER имеется еще один существенный при проведении среднemasштабных палеогеографических реконструкций недостаток. Среди цифровых моделей рельефа (Digital Elevation Models), различают Digital Terrain Models, отображающие именно рельеф земной поверхности, и Digital Surface Models, поверхность которых отображает такие элементы, как строения и кроны деревьев. ЦМР ASTER относится ко второй группе, поэтому проведение реконструкций по ней представляется возможным только для безлесных территорий.

Исходя из вышеизложенного, было решено самостоятельно создать цифровую модель рельефа на указанный регион по доступным топографическим и навигационным картам, сравнив впоследствии полученную модель для контроля точности с ЦМР ASTER. Модель была построена путем векторизации изогипс, изобат и прочих элементов рельефа с последующей интерполяцией методом кригинга [6]. Данный подход также имеет недостатки: некоторые элементы рельефа, такие как седловины или ложбины, «теряются», или излишне сглаживаются [13, 17]. На Рис. 5 представлен северо-запад острова Валаам, представленный на ЦМР ASTER и на ЦМР, подготовленной по топографическим картам, а также карта разницы высот двух моделей (темным цветом показаны области, где ASTER ниже). Как можно заметить, все отрицательные элементы рельефа оказываются сглаженными (и недостаточно «глубокими») по сравнению с ASTER. Кроме того, подверженными «генерализации» оказываются также и положительные элементы рельефа.

На Рис. 6 представлен фрагмент территории острова Валаам с изолиниями, полученными из ЦМР ASTER (темные) и из ЦМР, построенной по топокартам (светлые). «Потерянными» оказались две вершины в левой части фрагмента. Источников подобных ошибок несколько: во-первых, уровень геометрической генерализации карт, во-вторых, довольно большое сечение рельефа на доступных картах, в-третьих, недостатки метода интерполяции [10, 12].



*Рис. 5. Слева: фрагмент ЦМР ASTER, справа: фрагмент ЦМР, построенной по топокартам; в середине: разница между моделями (коричневым цветом показаны области, где ASTER ниже).*

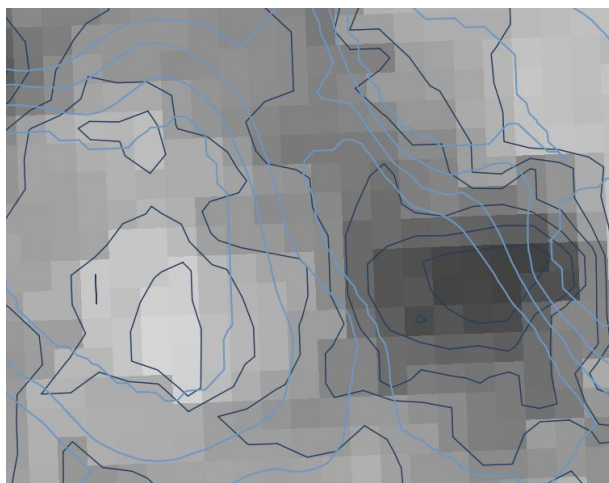


Рис. 6. Фрагмент с горизонталями, построенными по ЦМР ASTER (темные) и по топографическим картам (светлые).

Несмотря на описанные неточности, полученная цифровая модель современного рельефа была признана наиболее приемлемой и использовалась для проведения палеореконструкций изменения уровня Ладоги за последние 3 тысячи лет. По модели, скорректированной за счет изостатического поднятия, вычислялся уровень изоляции озер в необходимый момент времени, для которого получены радиоуглеродные датировки. По палеолимнологическим данным,  $3020 \pm 120$  лет назад происходит обособление озера Антониевского (1), уровень воды Ладожского озера по расчётам (с учётом изостатического поднятия) составляет 9,8 метра над уровнем моря (Рис. 7). Приблизительно в это же время происходит изоляция озера Зимнякового (2).  $2820 \pm 80$  лет назад происходит отделение озера Витальевского (3), уровень воды при этом составляет 7,8 метра (Рис. 8).  $2730 \pm 70$  лет назад происходит обособление озера Крестового (4), уровень воды по расчётам 5,4 метра (Рис. 9). 2590 лет назад уровень воды Ладоги опускается до отметки в 5,2 метра, то есть примерно нынешней высоты уреза, и происходит изоляция озера Никоновского (5). Озёра Восточное и Западное Игуменские (6) остаются частью Ладожского озера.

Таким образом, описанный геоинформационный подход был успешно применен для реконструкции изменения уровня Ладожского озера в его северной части за последние 3000 лет.

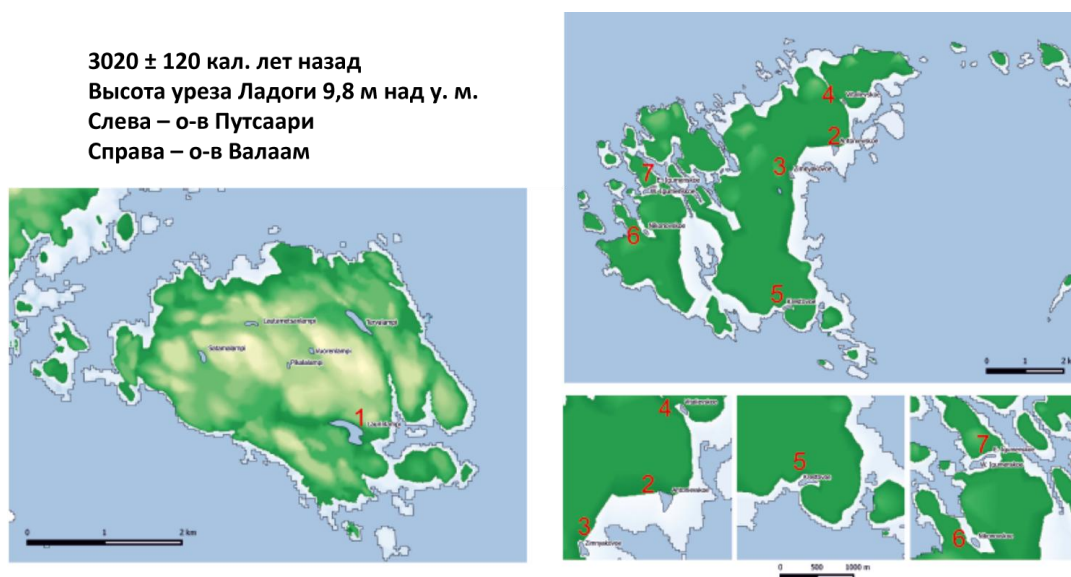
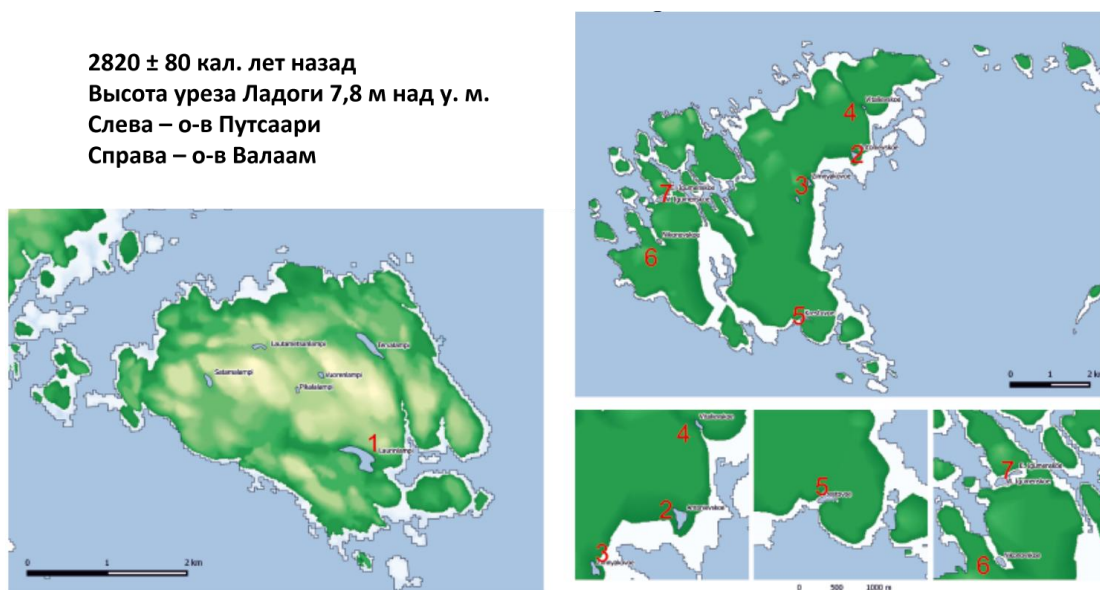
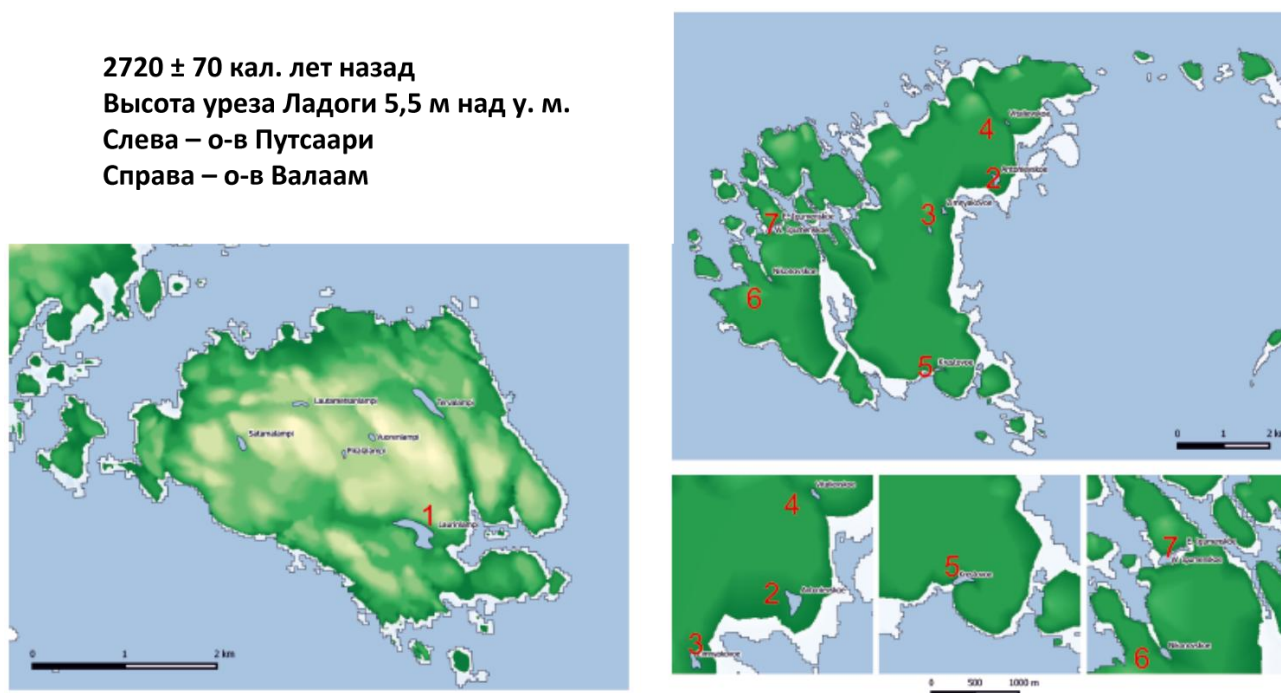


Рис. 7. Положение береговой линии  $3020 \pm 120$  лет назад. Цифрами обозначены: 1 – оз. Лаурилампи (Св. Сергия), 2 – оз. Антониевское, 3 – Зимняковое, 4 – Витальевское, 5 – Крестовое, 6 – Никоновское, 7 – Восточное и Западное Игуменские. Слева – о-в Путсаари, справа – о-в

*Валаам с укрупненными фрагментами. Более темным изображены нынешняя береговая линия, более светлым – на указанный момент времени.*



*Рис. 8. Положение береговой линии 2820 ± 80 лет назад. Условные обозначения см. Рис. 7*



*Рис. 9. Положение береговой линии 2720 ± 70 лет назад. Условные обозначения см. Рис. 7.*



Литература:

1. Галаганов О. Н., Горшков В. Л., Гусева Т. В., Розенберг Н. К., Передерин В. П., Щербакова Н. В. Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 8, №2, 2011. С. 130-136.
2. Крупенникова И. С., Мокрова А. Н., Гусева Т. В. Современные деформации и сейсмичность земной коры Балтийского щита // Материалы Четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара Москва, 5–9 октября 2015 г.
3. Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Корнеевкова Н. Ю., Денисенков В. П., Лудикова А. В. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) // Известия РГО, Т. 146, вып. 3, 2014, с.29-40.
4. Alenius T., Grönlund E., Simola H., Saksa A. Land-use history of Riekkalansaari Island in the northern archipelago of Lake Ladoga, Karelian Republic, Russia / Vegetation History and Archaeobotany. 2004. Vol. 13. P. 23-31.
5. Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Djinoridze E. N., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A.. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quaternary International. 2009. Vol. 203. P. 33-51.
6. Carrara, A., Pike, R. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. Special Issue. Geomorphology. 2007.
7. Ekman, M., Mäkinen, J. Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. Geophys. J. Int. 126, 1996. P. 229–234.
8. Digital terrain analysis in soil science and geology // Igor V. Florinsky. Elsevier Inc., 2012. ISBN 978-0-12-385036-2.
9. Fujisada, H., Bailey, G., Kelly, G., Hara, S., Abrams, M. ASTER DEM performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43, 2005. pp. 2707–2714.
10. Geomorphometry: concepts software applications / Hengl, T. and Reuter, H. I. (eds) – Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2007. ISBN: 978-92-79-05046-6.
11. Mäkinen J., Lilje, M., Ågren, J., Engsager, K., Erikson, P.O., Jepsen, C.V., Olsson, P.-A., Saarinen, V., Schmidt, K., Svensson, R., Takalo, M., Vestol, O., 2006. Regional Adjustment of Precise Levelings around the Baltic. June 1-4, 2005. In: Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in Vienna, vol.38. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, pp. 171-183. 2006.
12. Pain C., 2005. Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales. In: Zerger A., Argent R. (Eds.), MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne, 2005. pp. 1430–1436.
13. Reuter I H., Wendroth, O., Kersebaum K., 2006. Optimisation of relief classification for different levels of generalisation. Geomorphology 77 (1-2), 2006. pp. 79–89.
14. Rosentau A., Veski S., Kriiska A., Aunap R., Vassiljev J., Saarse L., Hang T., Heinsalu A. & Oja T. 2011: Palaeogeographic model for the SW Estonian coastal zone of the Baltic Sea. In Harff J., Björck S. & Hoth P. (eds): *The Baltic Sea Basin*, 165–188. Central and Eastern European Development Studies, Springer-Verlag, Berlin.
15. Rosentau A., Muru M., Kriiska A., Subetto D. A., Vassiljev J., Hang T., Gerasimov D., Nordqvist K., Ludikova A., Lõugas L., Raig H., Kihno K., Aunap R. & Letyka N. Stone Age settlement and Holocene shore displacement in the Narva-Luga Klint Bay area, eastern Gulf of Finland // Boreas. 2013. P. 2-20. ISSN 0300-9483.
16. Saarnisto M. Late Holocene land uplift /neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia // Quaternary International. 2012. Vol. 260. P. 143-152.
17. Thompson J., Bell J., Butler C., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. Geoderma 100, 67–89.

**SOME ISSUES OF USING DIGITAL ELEVATION MODELS FOR THE PURPOSES OF  
PALEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS IN THE NORTHERN PART OF LAKE  
LADOGA**

*Anton Terekhov,*

engineer of laboratory of geography and environmental management,  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

E-mail: [a.terekhov@spbu.ru](mailto:a.terekhov@spbu.ru)

*Tatyana Sapelko*

senior researcher of laboratory of geography and environmental management, Institute of Limnology  
Russian Academy of Sciences

E-mail: [tsapelko@mail.ru](mailto:tsapelko@mail.ru)

*Abstract:* There are some issues in the researches of the paleolimnology group of Institute of limnology RAS, connected with necessity of creating GIS-reconstructions based on available data, for instance, on lake level changes. Discussing the mid-scale paleoreconstruction of Lake Ladoga water level during past 3000 years (in the northern part of the lake), an appropriate approach is suggested. The estimation of its error is mentioned. There is described the procedure of choosing the relevant digital elevation model for the purposes of the paleoreconstructions.

*Keywords:* paleolimnology, digital elevation model, glacioisostatic uplift, GIS, paleogeographic reconstruction, lake level changes

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА И РАЗГРУЗКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО

Игорь Владимирович Токарев  
к.г.-м.н., ведущий специалист, Научный парк  
Санкт-Петербургского государственного университета,  
Ресурсный центр «Геомодель»  
E-mail: [tokarevigor@gmail.com](mailto:tokarevigor@gmail.com)

Владимир Николаевич Рыбакин  
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией  
физических методов исследований  
ИНОЗ РАН  
E-mail: [v.n.rybakin@gmail.com](mailto:v.n.rybakin@gmail.com)

Владислав Александрович Румянцев  
д.г.н., академик РАН, научный руководитель ИНОЗ РАН  
E-mail: [rum.ran@mail.ru](mailto:rum.ran@mail.ru)

Григорий Юрьевич Воронюк  
начальник партии региональных гидрогеологических работ  
АО «Северо-Западное ПГО»  
E-mail: [greg.voronv@gmail.com](mailto:greg.voronv@gmail.com)

*Аннотация:* В 2013–2015 г. на Карельском перешейке выполнено региональное опробование подземных вод, проведено поквартальное опробование основных притоков Ладоги, а также в ходе нескольких рейсов – акватория с оценкой содержания дейтерия и кислорода-18. Показано, что вендском и рифейском водоносных комплексах присутствуют как современные воды, так и реликты Балтийского ледникового озера, имеющие весьма легкий изотопный состав. По результатам опробования северной части Ладоги, в районе подводных обрывов, сложенных рифейскими отложениями обнаруживается субаквальная разгрузка подземных вод, характеристики которой предполагается в дальнейшем уточнить на базе комплексного подхода, включающего изучение распределения температур и электропроводности водной толщи, а также изучения изотопно-геохимических трассеров.

*Ключевые слова:* дейтерий, кислород-18, субаквальная разгрузка подземных вод в Ладогу

*Введение.* Ладожское озеро является уникальным природным объектом, активно используемым человеком. Рациональное регулирование хозяйственной деятельности, обеспечивающее сохранение качества воды, уровня биопродуктивности и других важных параметров водоема должно опираться на достоверные сведения о его водном и вещественном балансе, а также реакции на внешние воздействия. Водный баланс Ладоги формируется, в основном, за счет современных атмосферных осадков, а химический состав определяется масштабом взаимодействия с минеральным субстратом и антропогенным воздействием (главным образом, опосредовано, через разгрузку подземных вод и речной сток). Предполагается, что имеет место также прямая (субаквальная) разгрузка подземных вод в озеро, однако достоверные сведения о ее величине и локализации участков разгрузки пока отсутствуют. На наш взгляд, для решения задачи о количественной оценке масштабов субаквальной разгрузки наиболее подходящим является комплексный подход, включающий изотопно-гидрохимические и геофизические методы, причем значительный упор должен быть сделан на изучение подземных вод на водосборе.

В данном сообщении демонстрируется возможность использования информации об изотопном составе воды (содержаниях дейтерия –  $\delta^2\text{H}$  и кислорода-18 –  $\delta^{18}\text{O}$ ) для решения задачи по изучению условий субаквальной разгрузки подземных вод в Ладожское озеро.

*Анализ гидрогеологических условий.* Карельский перешеек в геолого-гидрогеологическом отношении представляет собой сочленение Ленинградского артезианского бассейна и Балтийского гидрогеологического массива. На севере территории обнажается кристаллический архей-протерозойский фундамент, в направлении на юг и юго-восток, вслед за пологим погружением его кровли, увеличивается мощность осадочного чехла (рис. 1).

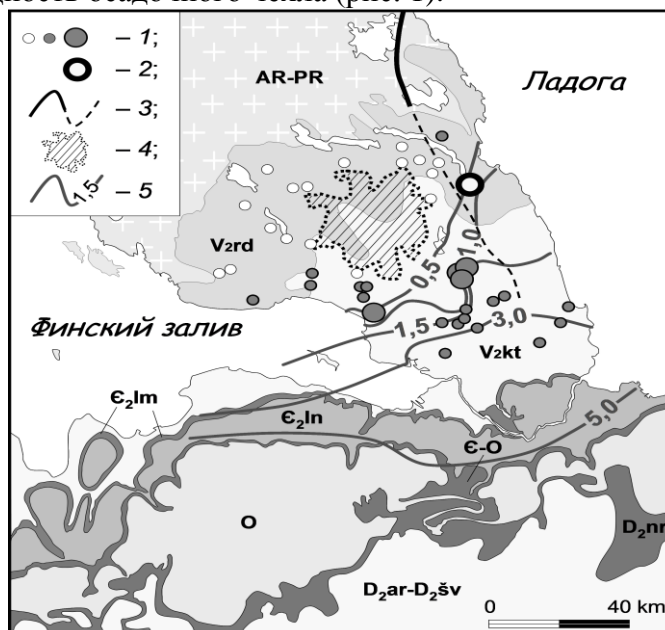


Рис. 1. Гидрогеологические условия и схема опробования подземных вод на Карельском перешейке (со снятым чехлом четвертичных отложений):

1 – скважины на вендский водоносный комплекс (воды с тритием, без трития, без трития и с аномально легким изотопным составом, соответственно); 2 – скважина на рифейские отложения (без трития и с аномально легким изотопным составом); 3 – западная граница Ладожского грабена (достоверная и предполагаемая); 4 – местная область питания (Лемболовские высоты, оконтуренные по изолинии +100 м); 5 – изолинии минерализации вендского водоносного комплекса, г/л.

На Карельском перешейке водоносными являются:

- кора выветривания в кровле кристаллического фундамента и зоны тектонических нарушений;
- песчано-глинистые отложения венда (вендский водоносный комплекс – ВВК) и четвертичного периода (межморенные водоносные горизонты – ММВГ и грунтовый горизонт);
- рифейские песчаники, в пределах Ладожского грабена стратиграфически размещающиеся между породами фундамента и ВВК и достигающие мощности 500 м.

Граница выклинивания ВВК имеет сложный вид и определяется современным рельефом и эрозионными палеоврезами (рис. 1). Мощность комплекса изменяется от первых метров на северо-западе до 168 м на юго-востоке перешейка. Вендский и четвертичный водоносные комплексы разделены верхневендским (котлинским) региональным водоупором, который выклинивается на севере и северо-западе и достигает мощности 118 м на юго-востоке.

Питание ММВГ и ВВК, когда они оказываются на поверхности, происходит за счет прямой инфильтрации атмосферных осадков (рис. 1). В зоне распространения котлинских глин инфильтрационное питание отсутствует, а перетекание, как показывает региональное численное моделирование, становится невелико, вследствие чего региональный поток приобретает латеральный характер.

Обратим внимание на два важных факта.

1) При удалении от современной области питания (Лемболовские высоты, рис. 1) ВВК становится напорным, величина напора увеличивается с севера на юг. В долине р. Свирь и других рек, впадающих в озеро на юге, скважины на ВВК на побережье Ладоги фонтанируют, высота фонтанов от 3 до 18 метров. Высоконапорными являются также воды рифейских отложений Ладожского грабена на западном берегу озера.

2) Выявление региональной области разгрузки вызывает затруднение в силу отсутствия достоверной схемы изогипс напоров/уровней подземных вод. Предполагается, что разгрузка ММВГ происходит преимущественно в Финский залив и р. Нева, а ВВК – в Ладожское озеро и, в меньшей степени, в Финский залив. Роль р. Нева, как дрены для ВВК, вероятнее всего, незначительна в силу большой мощности перекрывающего водоупора.

По мере движения подземных вод ВВК от области питания к югу и юго-востоку наблюдается заметный рост минерализации воды от 0,5 до 3 г/л, а на правобережье р. Нева минерализация достигает 5–7 г/л (рис. 1). Как правило, при минерализации более 0,4 г/л гидрокарбонатные кальциево-магниево-натриевые воды меняют состав на хлоридный натриевый, при этом по отдельным компонентам возникает превышение ПДК [1]. В юго-восточной части Карельского перешейка увеличение минерализации наблюдается и с глубиной.

Опробование на тритий проведено в окрестностях Лемболовской возвышенности, в зоне выхода ВВК на земную поверхность и небольшой мощности котлинских глин (точки с белой заливкой на рис. 1). Содержания трития составляют 4–15 ТЕ при фоне в атмосферных осадках 9–17 ТЕ [2], что указывает на относительно малый возраст воды ВВК в этом районе.

Взвешенный среднегодовой изотопный состав атмосферных осадков региона  $\delta^{18}\text{O} = -11,8 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -84 \text{ ‰}$  рассчитан с учетом распределения объема и состава выпадений в период наблюдений 2012–2015 г. на станциях «Петродворец» и «Ламмин-Суо» (район г. Зеленогорск). Судя по содержаниям дейтерия и кислорода-18, запасы подземных вод ВВК, обнаруживаемые вблизи области питания и содержащих значимые количества трития, восполняются преимущественно за счет осадков холодного периода года и во время весеннего половодья (точки с белой заливкой на рис. 1 и 2), что подтверждается наблюдениями по режимным скважинам.

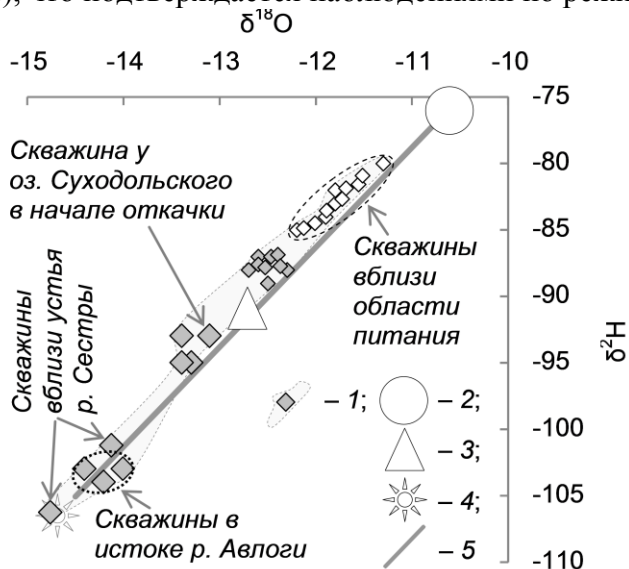


Рис. 2. Изотопный состав подземных вод вендского водоносного комплекса на Карельском перешейке: 1 – точки опробования (точки увеличенного размера с подписями обсуждаются в тексте, на рис. 1 они также показаны значками увеличенного размера); 2 – среднегодовой состав атмосферных осадков; 3 – средний состав осадков холодного периода года; 4 – средний состав снега по данным съёмок 2011–2013 г.; 5 – локальная линия метеорных вод, оцененная по результатам мониторинга атмосферных осадков в 2012–2015 г. на станциях «Петродворец» и «Ламмин-Суо».

По-видимому, на Карельском перешейке обнаруживаются следы вод, поступивших в ВВК в конце плейстоцена и начале голоцена, когда еще сохранялось влияние предыдущего похолодания (на рис. 1 и 2 показаны значками увеличенного размера). В одних случаях вода ВВК оказывается несколько легче средних осадков за холодный период года (группа из четырех точек, включая скважину около оз. Суходольского), а в других – даже приближается к среднему изотопному составу снегового покрова (рис. 2). Скважины, в которых обнаружены воды наиболее легкого изотопного состава, расположены вблизи изолинии минерализации 1 г/л (рис. 1), а территориально – в истоках р. Авлоги и вблизи устья р. Сестры.

В связи с обнаружением аномально легких вод следует сделать несколько замечаний по истории развития исследуемой площади.

Особенностью Беломоро-Балтийского региона, включающего юго-восточную часть Балтийского гидрогеологического массива, а также Ленинградского и часть Северо-Двинского артезианских бассейнов, являются значительные климатические вариации и резкая смена конфигурации и уровней палеоводоемов в позднем плейстоцене и голоцене (рис. 3). Морской бассейн, существовавший в период микулинского межледниковья (115–130 т.л.н.), простирался от Балтики до Белого моря. Микулинское море, также как современные Балтийское и часть Белого моря, было опреснено за счет речного стока. Само межледниковье было примерно на 1,2 °С более теплым, чем современное. Ледниковый покров, возникавший неоднократно в период валдайского оледенения, имел максимумы около 18, 60 и 85 т.л.н.. В пиках похолоданий среднегодовая температура была на 4–6 °С ниже современной, происходило периодическое осушение водоемов и заполнение их ванн льдом, а также промораживание пород на территориях, не занятых ледником.

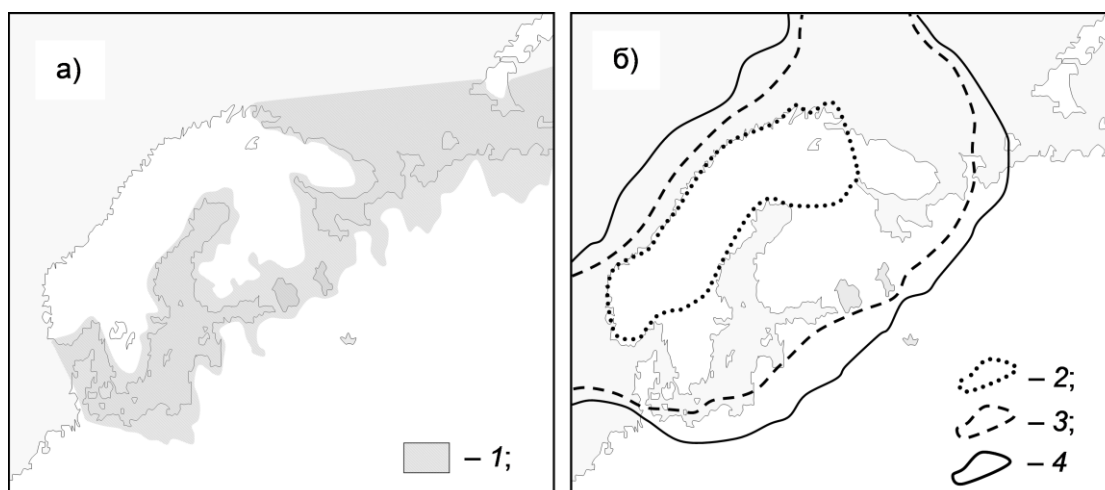


Рис. 3. География Беломорско-Балтийского бассейна в позднем плейстоцене и голоцене  
а) Микулинское море (115–130 тыс.л.н.) и б) границы ледовых щитов в период валдайского оледенения:

1 – Микулинское море; 3, 4, 5 – основные максимумы похолодания 85, 60, 18 тыс. лет назад, соответственно (адаптировано из [3]).

При отступлении ледника образовывались приледниковые водоемы, развитие которых определялось стадиями отступления ледника, уровнями стока и тектоникой. Так Ладожское озеро на разных этапах являлось заливом Балтики или самостоятельным водоемом. В начале голоценового потепления (11 тыс. лет назад) Балтийское ледниковое озеро достигало современных отметок +100...+120 м. Около 8,5 тыс. лет назад наступил и продолжался примерно 3 тыс. лет голоценовый климатический оптимум, характеризовавшийся несколько более теплым, чем настоящее время, климатом. Современная система озер Северо-запада начала формироваться примерно 5 тыс. лет назад. Окончательный разрыв Ладожско-Балтийского соединения произошел около 3,7 тыс. лет назад. В это время уровень Ладожского озера упал почти до современных

отметок. Современная р. Нева является относительно молодым образованием и имеет оценочный возраст около 3,5 тыс. лет.

Подземные воды в описываемое время испытывали существенное воздействие географо-климатических изменений. В периоды затопления Беломоро-Балтийского бассейна морем или приледниковыми пресноводными водоемами в прибрежной зоне создавались условия для инъекции поверхностных вод в подземную гидросферу под избыточным давлением, достигавшим нескольких атмосфер. При похолодании, когда уровень водоемов понижался в связи с падением уровня Мирового океана, должна была интенсифицироваться разгрузка подземных вод, в том числе, из относительно глубоких горизонтов. В этот же период, вследствие общей аридизации климата, приповерхностные водоносные горизонты должны были осушаться.

Кроме изменения границ водоемов и ледников, на состояние водоносных горизонтов существенное влияние должно было оказывать появление и исчезновение ледниковых покровов. В перигляциальной зоне похолодание вызывало возникновение мерзлоты и ее таяние – в периоды потепления. На участках, где мощность гляциального покрова превышала 500–700 м, возникал поток талых подземных вод от подошвы ледника и тающей мерзлоты. Промерзание геологического разреза приводило к возникновению зоны относительно более пресных подземных льдов у поверхности и отжатию остаточных, более соленых, вод (криопегов) вниз по разрезу. При последующем таянии подземных льдов образовывалась зона «возрожденных» пресных подземных вод.

Формирование аномально легких вод в ВВК и рифейских отложениях (рис. 2), вероятнее всего, следует связать с инъекцией вод Балтийского ледникового озера. Аналогом этой ситуации является район г. Таллинна, где комплексом изотопно-геохимических методов и с помощью датирования достоверно показано, что воды аномально легкого изотопного состава являются реликтами Балтийского ледникового озера [4].

Данный вывод косвенно подтверждается наблюдением за химическим составом воды. В направлении от современной области питания ВВК на юг и юго-восток, в сторону потенциальных региональных базисов дренажа – Ладоги и Невы, минерализация подземных вод увеличивается сначала плавно, затем градиент нарастания солености резко возрастает (образуется «ступенька»), а в долине р. Невы и на ее левобережье скорость роста минерализации опять замедляется (рис. 1). Похоже, что неоднородность профиля роста минерализации и аномалии в изотопном составе связаны с проникновением в ВВК пресных вод атмосферного происхождения в голоцене, которые изотопически оказываются существенно тяжелее талых вод Балтийского ледникового озера.

*Разгрузка подземных вод в поверхностные водотоки.* В 2013–2015 г. выполнялось поквартальное опробование основных притоков Ладоги в их устьях (14 рек). В среднем, за период наблюдений для практически всех рек  $\delta^{18}\text{O} \approx -11,2 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -83 \text{ ‰}$ , в Ладоге  $\delta^{18}\text{O} \approx -10,4 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -75 \text{ ‰}$  и р. Неве  $\delta^{18}\text{O} \approx -10,1 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -77 \text{ ‰}$ . В годовом разрезе времени изотопный состав речных вод, как правило, меняется на  $\pm 1,7\text{--}1,5 \text{ ‰}$  по кислороду-18 (что существенно больше ошибки измерений, которая составляет около 0,1 ‰). Обнаружено, однако, что в р. Авлога изотопный состав воды практически постоянен в течение всего года, составляя, в среднем, около  $\delta^{18}\text{O} \approx -12,6 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -88 \text{ ‰}$  и изменяясь менее, чем на 0,3 ‰. Сезонный размах вариаций изотопного состава в р. Авлога относительно среднегодовых значений даже меньше, чем в р. Неве, состав которой зарегулирован Ладогой. Относительно легкий изотопный состав речной воды, в среднем, около  $\delta^{18}\text{O} \approx -12,4 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} \approx -85 \text{ ‰}$  обнаружен также в нижнем течении р. Сестры, руч. Пасторском и их притоках в августе 2015 г. Однако, здесь опробование было проведено однократно, поэтому пока не будет приниматься во внимание, хотя продолжение этих работ, несомненно, представляет интерес.

Из общих соображений ясно, что изменения в изотопном составе речного стока во времени являются отражением сезонных вариаций состава осадков. При этом, чем меньше доля подземного питания и площадь водосбора, тем значительнее должны быть вариации. Отметим также, что в исследуемом районе зимние осадки сбрасываются по руслу реки в довольно короткий промежуток времени в период снеготалого половодья и имеет место летний пик осадков. Поэтому средний



состав речной воды, исходя из общих соображений, должен иметь промежуточные значения между составом подземных вод и составом летних осадков.

Водосбор р. Авлога имеет довольно высокую степень заболоченности и заозеренности (до 40 %). Однако, сама Авлога относится к малым рекам, время сбегания волны половодья на ней не превышает 10 суток, поэтому на ее водосборе невозможно осреднение осадков за значительный промежуток времени. Следовательно, стабильный и легкий изотопный состав воды в ней может быть интерпретирован как наличие современной разгрузки регионального потока изотопически легких глубинных вод из рифейских и вендских отложений.

*Разгрузка подземных вод в Ладожское озеро.* Для Ладожского озера характерен довольно узкий диапазон вариаций изотопного состава воды  $\delta^2\text{H} = -85..-71 \text{‰}$  и  $\delta^{18}\text{O} = -11,5..-9,5 \text{‰}$  [5]. То есть, озеро является хорошо перемешанным резервуаром, что отражает его димектический характер. Отмечается некоторое утяжеление изотопного состава воды в озере за счет испарения (точки смещены вправо-вверх относительно начального состава рис. 4).

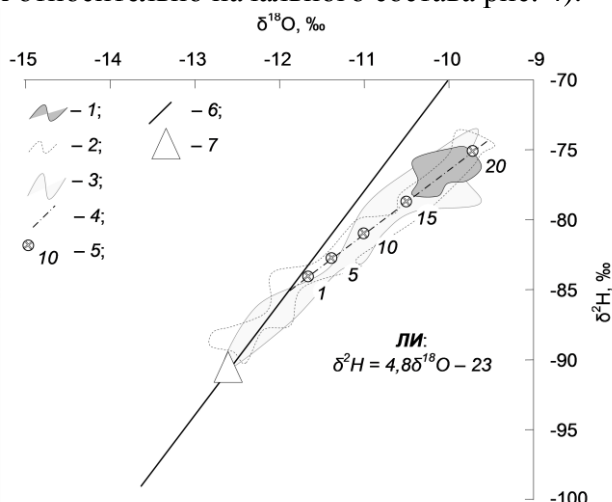


Рис. 4. Изотопный состав природных вод в бассейне Ладожского озера:

1 – Ладога (рейсы 2013–2015 г.); 2 – основные притоки Ладоги (2013–2016 г.); 3 – малые озера Карельского перешейка; 4 – линия испарения по экспериментальным данным (уравнение на диаграмме); 5 – доля испаренной воды, %; 6, 7 – локальная линия метеорных вод и среднегодовой состав осадков в районе Санкт-Петербурга (станции «Петергоф» и «Ламмин-Суо»).

В северной (глубоководной) части Ладожского озера породы рифейского комплекса обнажаются на пологих склонах его дна и в виде уступов и обрывов (рис. 5). В этой части озера в августе 2015 г. на нескольких станциях по профилю субпараллельному береговой линии были проведены работы по опробованию разреза водной толщи.

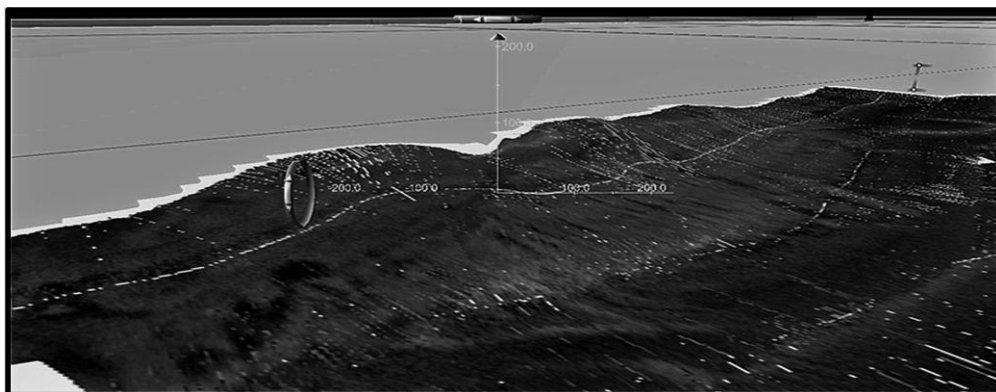


Рис. 5. Вид склона дна в северной части Ладожского озера, вдоль которого прослеживается обнажение рифейских пород. Получено с помощью многолучевого эхолота EM2040, глубины от 70 до 180 метров.



Вблизи подводных обрывов, образованных рифейскими песчаниками, на фоне относительно стабильного изотопного состава, близкого к среднему для Ладоги, на некоторых глубинах обнаруживаются аномалии с несколько более изотопически легкой водой (рис. 6). По соотношению с электропроводностью и температурой, верхняя аномалия идентифицируется как слой талой снеговой воды, а нижняя – как субаквальная разгрузка подземных вод из рифейских отложений (выделена на рис. 6 серой полосой).

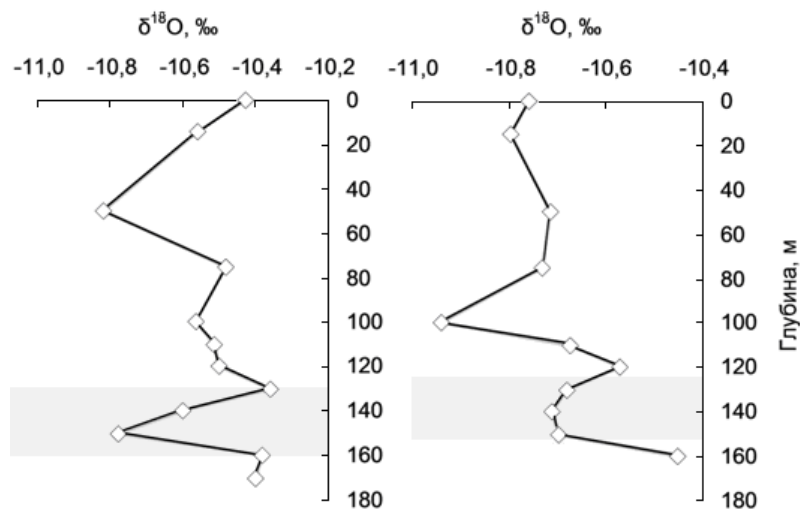


Рис. 6. Пример распределения по глубине изотопного состава кислорода в северной ванне Ладожского озера 2015 г. (слой воды, предположительно включающий субаквальную разгрузку подземных вод из рифейских отложений, выделен серой полосой, нижняя точка на графике соответствует пробе придонной воды).

Данные изотопных исследований в акватории Ладожского озера, совместно с анализом результатов региональных работ на Карельском перешейке, позволяют предположить, что имеет место заметная субаквальная разгрузка подземных вод в Ладожское озеро. Наиболее вероятно, что источником данной разгрузки являются рифейские песчаники Ладожского грабена, содержащие изотопически аномально легкую воду, исходное происхождение которой следует связать с существованием в прошлом Балтийского ледникового озера.

Локализацию участков субаквальной разгрузки подземных вод и оценку объемов разгрузки на этих участках предполагается выполнить на основании комплекса работ, включающего:

- построение трехмерной геометрической модели теплового поля и электропроводности водной толщи в северной ванне озера, основанной на полевых измерениях;
- изотопно-геохимическую характеристику выявленных аномалий температур и электропроводности, включая данные по изотопному составу воды, содержаниям гелия и радона, а также химическому составу.

Наличие данных по химическому и изотопному составу воды рифейских отложений на западном берегу Ладоги позволяет предположить, что качество воды в источнике субаквальной разгрузки и условия формирования его баланса могут быть оценены.

В дальнейшем планируется актуализация существующей математической модели озера, причем ее верификацию и калибровку предполагается выполнять, в том числе, на основании выделения вклада генетических составляющих и испарения в водный и вещественный баланс Ладожского озера оцененных на основании мониторинга изотопного состава притоков озера и акватории.

#### Литература:

1. Токарев И. В., Шварц А. А., Боровицкая Е. Ю. Экологические проблемы эксплуатации подземных вод Карельского перешейка // Вестник СПбГУ. Серия 7 «Геология и география». – 2013. - вып. 2. - С. 21–31.
2. Kortelainen N. Isotopic composition of atmospheric precipitation and shallow groundwater in Olkiluoto: O-18, H-2 and H-3. Geological Survey of Finland and POSIVA OY. Olkiluoto-Eurajoki, Finland. - 2009. - 23 P.
3. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB. Technical Report TR-10-49. Stockholm. - 2010. - 328 P.
4. Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., Jõelett A., Karro E., Marandi A., Savitskaja L. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin // Chemical Geology. - 2009. - Vol. 258. - P. 219–231.
5. Румянцев В. А., Рыбакин В. Н., Токарев И. В. Исследование Ладожского озера и его притоков с помощью изотопных индикаторов // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции "Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.", Петрозаводск, 6-11 июля 2015 г. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. - т. 1. - С. 468 – 472.

### **HYDROGEOLOGICAL SETTINGS OF KARELIAN ISTHMUS AND SUBAQUEOUS DISCHARGE OF GROUNDWATER IN LADOGA LAKE**

Igor Vladimirovich Tokarev  
Ph.D., senior researcher, Resource Center "Geomodel"  
Research Park of Saint-Petersburg State University  
E-mail: [tokarevigor@gmail.com](mailto:tokarevigor@gmail.com)  
Vladimir Nikolaevich Rybakin  
Ph.D., head of the laboratory  
physical research methods of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [v.n.rybakin@gmail.com](mailto:v.n.rybakin@gmail.com)  
Vladislav Aleksandrovich Rumyantsev  
D.Sc., academician of the RAS, scientific director of  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [rum.ran@mail.ru](mailto:rum.ran@mail.ru)  
Grigoriy Yurievich Voronyuk  
chief of Regional Hydrogeological Investigations Department  
of AO "North-Western PGO"  
E-mail: [greg.voronv@gmail.com](mailto:greg.voronv@gmail.com)

*Abstract:* In 2013-2015 on the Karelian Isthmus was carried out regional sampling of groundwater, quarterly testing of the main tributaries of Lake Ladoga, and also several times its aquatory with the assessment of deuterium and oxygen-18 abundance in water. It is shown, that the Riphean and Vendian aquifers content the modern as well as the relicts groundwater, which formed from the Baltic glacial lake and have very light isotopic composition. According to the results of testing the northern baths Ladoga, in the area of underwater cliffs, composed by Riphean deposits, the subaqueous discharge of groundwater was found. Characteristics of this water, as it is expected, will be clarified by integrated approach, which includes the study of the distribution of temperature and conductivity of the water column as well as the study of isotope geochemical tracers.

*Keywords:* deuterium, oxygen-18, subaqueous discharge of groundwater in Ladoga Lake

**КРУПНЫЕ ОЗЕРА КАК ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

Юрий Александрович Трапезников,  
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник  
ИНОЗ РАН  
E-mail: trapeznikov@inbox.ru

*Аннотация:* Глобальные изменения климата в виде смены ледниковых эпох периодами климатических потеплений обусловлены астрономическими факторами. Такие климатические изменения преобразуют ландшафты и меняют функционирование экосистем крупных водоемов. Поэтому природные летописи высотных отметок уровня воды и состава донных отложений крупных озер являются надежными индикаторами прошлого климата Земли.

*Ключевые слова:* климат, оледенение, потепление, крупные озера, индикаторы климата

Многокомпонентность климатической системы, сложность и разнообразие ее временной и пространственной изменчивости в сочетании с наличием большого разнообразия формирующих факторов и большой неопределенности взаимодействия элементов системы атмосфера-океан-суша приводят к проблематичности выделения какой-либо одной причины, объясняющей современные климатические изменения. На климат нашей планеты влияют не только локальные факторы, такие как деятельность человека, эволюция земной коры и т.п., но и внешние (астрономические и астрофизические) факторы, такие как гравитационные возмущения Солнца, Луны и планет Солнечной системы, электромагнитная структура Галактики и распределение в ней космического вещества.

В масштабах нашей Галактики встречаются пространственные неоднородности, состоящие из холодной газопылевой среды и более разреженного горячего газа. В зависимости от плотности космического вещества, в которое погружается Солнечная система в своем вращении вокруг центра нашей Галактики, будет происходить соответствующее изменение температуры на Земле. Впервые зависимость энергетики Земли и Солнечной системы от энергетики Вселенной была сформулирована Боголеповым М.А. [1]: «прохождение солнечной системой неоднородных областей нашей Вселенной связано с пересечением различных электромагнитных структур». В дальнейшем на влияние неоднородности галактической структуры на Солнечную систему обратил внимание в 1958 г. Академик В.А. Амбарцумян. В докладе на первом заседании президиума СО Академии наук он сообщил, что по данным радиотелескопов Солнечная система с середины 1950-х годов начала пересекать пространственное скопление галактического вещества. В настоящее время факт прохождения Солнцем системы газопылевых облаков признаётся большинством астрономов.

Глобальные изменения климата в виде смены ледниковых эпох периодами климатических потеплений обусловлены астрономическими факторами. Такие климатические изменения преобразуют ландшафты и меняют функционирование экосистем крупных водоемов. Поэтому природные летописи высотных отметок уровня воды и состава донных отложений крупных озер являются надежными индикаторами прошлого климата Земли. Проиллюстрируем это утверждение на примере природных летописей историй Ладожского озера и Каспийского моря.

Предыстория Ладожского озера связана со стадиями отступления ледника и образования Балтийского моря. В Невскую стадию (около 12 т.л.н.) край ледника располагался южнее Финского залива, Ладожской и Онежской котловин. Сами эти бассейны еще не были свободны ото льда. Отдельные приледниковые озера сбрасывали свои воды на юг. По мере отступления ледника на север приледниковые озера слились, образовав в результате Южно-Балтийское приледниковое озеро. Дальнейшее отступление ледника привело к образованию Балтийского ледникового озера. Это событие произошло примерно 11 т. л. н. Тогда край ледника проходил по южной границе Ботнического залива и далее следовал вдоль северных побережий Финского залива и Ладоги. В

северной части Карельского перешейка образовался пролив, который соединил акваторию Балтийского ледникового озера с его Ладожским заливом. Поскольку озеро имело положительный водный баланс, его уровень находился в трансгрессивной фазе. Эта стадия развития Балтики закончилась около 10 т. л. н., когда ото льда освободилась Среднешведская низина, образовавшая проход, соединивший Балтийское ледниковое озеро с океаном. Произошло выравнивание уровней океана и озера и вторжение соленых морских вод в котловину Балтики [3]. Вновь образовавшийся бассейн носит название Иольдиевое море (по названию арктического моллюска Иольдия, который вселился тогда в бассейн моря). Начальный уровень Иольдиевого моря был очень низкий (не выше – 50 м). Поэтому произошло осушение залива, который соединял Балтийское ледниковое озеро с его Ладожским заливом. На месте залива образовалась протока, по которой шел сток из обособившегося Ладожского озера в Иольдиевое море. Это событие можно считать датой образования Ладоги. В период Иольдиевого моря Ладожское озеро существовало как самостоятельный водоем. Сток из Ладоги шел через северную часть озера по Карельскому перешейку. Порог стока проходил около п. Вещево, расположенного вблизи г. Выборг. Поскольку уровень океана и Иольдиевого моря в то время находился на 50 м ниже современного, а воды Иольдиевого моря не проникали в ладожскую котловину, то можно считать, что порог стока у п. Вещево не был ниже -50 м. В настоящее время минимальная высотная отметка вблизи предполагаемого порога стока у п. Вещево равна 15 м. Это означает, что общая амплитуда изостатического подъема порога стока от момента образования Ладожского озера до наших дней составляет 65 м. Освободившаяся от ледовой нагрузки земная кора стала быстро восстанавливать нарушенное статическое равновесие. Изостатическое поднятие средней Швеции, которое опережало рост уровня океана, вызвало уменьшение глубины пролива, соединявшего Иольдиевое море с океаном. В результате этого приток соленых вод в котловину моря сначала уменьшился, а затем прекратился. Примерно 9.5 т. л. н. Иольдиевое море превратилось в пресноводный водоем, за которым закрепилось название Анцилового озера (по названию чашечной улитки Анцилус филоватилис, характерной для его береговых отложений). Достаточно скоро уровень озера достиг высоты самого низкого перевала через водораздел, который проходил несколько южнее Копенгагена. Седловина перевала была на 7-8 м ниже современного уровня моря. Стоковая эрозия протока вызвала регрессию Анцилового озера до глубины на 20 м ниже современного уровня моря. Анцилово озеро продолжало существовать до 8 т. л. н. Когда изостатическое поднятие суши на южной окраине Скандинавии замедлилось, а скорость эвстатического подъема уровня океана (в связи с климатическим оптимумом) увеличилось, соленые воды океана стали проникать в балтийскую котловину. Уровень вновь образовавшегося моря стал непрерывно повышаться. Повышение уровня было достаточно медленным, поскольку большая часть льдов к этому времени уже растаяла. Примерно 5 т. л. н. уровень Ладоги вплотную приблизился к современному.

В настоящее время установлено множество трансгрессивных и регрессивных стадий колебаний уровня Каспийского моря [3,4]. Палеогеоморфологический анализ сохранившихся древних береговых форм в сочетании с радиоуглеродным методом определения абсолютного возраста раковых моллюсков позволяют представить уровневый режим Каспийского моря за период почти 400 тыс. лет. Эти данные свидетельствуют о том, что амплитуда колебаний уровня моря могла достигать 300 м. В периоды крупных трансгрессий (таких как бакинская, хазарская, раннехвалынская) часть вод из Каспия могла стекать через Кума-Манычский пролив в Черное море. Правда, при этом одновременно мог возникать и дополнительный приток поверхностных вод из Средней Азии по долине Узбоя (древнему руслу Амударьи). Микулинское межледниковье (до 75 тыс. лет назад) с очень низким стоянием уровня (до – 45 м БС) сменилось чередой валдайских оледенений (75-16 т. л. н.), которым соответствовало высокое положение уровня (от 15 до 50 м БС). Достаточно холодный пребореальный период (15-11 т. л.) воспринимается как переходный от последнего валдайского оледенения к голоцену. Современный (субатлантический) период голоцена (последние 2.5 тыс. лет) имеет размах уровней колебаний 12.5 м (от -34.5 до -22 м БС). Период инструментальных измерений с разбросом уровня в 3.9 м целиком вписывается в диапазон колебаний субатлантического времени. Этот период характеризуется чередованием трансгрессивных и регрессивных фаз относительно среднего уровня (-28 м БС). Последняя

трансгрессивная фаза приходилась на начало XVII в. и продолжалась до середины XIX в. Графики современных среднегодовых значений уровня воспринимаются как часть долгопериодного колебания, период которого гораздо больше интервала инструментальных наблюдений. Если расширить ряд инструментальных измерений уровня моря привлечением исторических данных, то к концу XVIII века уровень Каспия был около -22 м БС, т.е. на 6 м выше современного. Падение уровня Каспия от отметки -22 м БС в 1781 г до современных отметок уровня моря может восприниматься как часть нисходящей ветви гипотетического долгопериодного колебания. В целом этот исторический обзор служит иллюстрацией зависимости режима уровня Каспийского моря от колебаний климата.

Приведённые примеры показывают, насколько яркими индикаторами колебания климата являются природные летописи изменения уровня воды крупных водоёмов.

#### Литература:

1. Боголепов М. А. Колебания климата и историческая жизнь. - 1912. – С.190.
2. Варущенко С. И., Варущенко А. Н., Клиге Р. К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоёмов в палеовремени. – 1987. – С.240.
3. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. – 2002.- С.327.
4. Румянцев В. А., Трапезников Ю. А. Стохастические модели гидрологических процессов. – 2008.- С. 152.

### **LARGE LAKES AS CLIMATE CHANGE INDICATORS**

Yuri Aleksandrovich Trapeznikov,  
Ph. D, leading researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [trapeznikov@inbox.ru](mailto:trapeznikov@inbox.ru)

*Abstract:* Global climate change as a change of glacial periods of climatic warming due to astronomical factors. Climatic changes are transforming the landscape and change the ecosystem functioning of large water bodies. Natural chronicle of the elevations of the water level and composition of bottom sediments of large lakes are reliable indicators of the past climate of the Earth.

*Keywords:* climate, glaciation, warming, great lakes, indicators of climate

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОЙ РАФИДОФИТОВОЙ ВОДОРΟΣЛИ В ПРИТОКАХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Ирина Сергеевна Трифонова,  
д.б.н., проф., главный научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

E-mail: [itrifonova@mail.ru](mailto:itrifonova@mail.ru)

Оксана Александровна Павлова,  
к.б.н., старший научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

Анна Леонидовна Афанасьева,  
научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

*Аннотация:* По данным многолетних исследований проанализировано распространение рафидофитовой водоросли *Gonyostomum semen* в притоках Ладожского озера. Впервые отмеченный в некоторых притоках с середины 90-х гг. прошлого столетия, в настоящее время этот вид найден почти во всех реках бассейна. Исследования последних лет выявили заметное увеличение численности *Gonyostomum* и его роли в общей биомассе фитопланктона большинства рек. Полученные данные подтверждают, что массовое развитие *Gonyostomum* связано с эвтрофированием водоемов с высокой цветностью.

*Ключевые слова:* рафидофитовые водоросли, *Gonyostomum*, притоки Ладоги, эвтрофирование, распространение

Наиболее очевидным негативным последствием эвтрофирования пресноводных водоемов является «цветение» воды, вызываемое массовым развитием цианобактерий (сине-зеленых водорослей), многие из которых выделяют токсические вещества, вызывающие аллергические реакции у человека и животных. Помимо цианобактерий потенциально токсическими являются и рафидофитовые водоросли, достаточно широко распространенные в водоемах умеренной зоны, как правило, в незначительных количествах в небольших стоячих водоемах с ацидной гуминовой водой, лесных озерах, старицах рек и в сфагновых болотах [1,2]. Морские рафидофитовые водорослей являются организмами «красных приливов», вызывающих гибель рыбы у берегов Японии и США. Массовое развитие пресноводного представителя этой группы *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing впервые отмечено в конце 60-х гг. прошлого столетия в южных районах Швеции, преимущественно в озерах с рН воды от 5.5 до 6.8 [10]. С конца 1970-х гг. массовое развитие *Gonyostomum* наблюдалось уже и в озерах Финляндии [11]. Считалось, что причиной экспансии вида является ацидификация водоемов Фенноскандии в результате выпадения кислых дождей [10]. Существует также мнение, что массовое развитие *Gonyostomum* обусловлено обогащением ацидных водоемов биогенными веществами в результате эвтрофирования [13,14]. Из-за массового развития *Gonyostomum* снижается биоразнообразие водных экосистем. В результате биологического загрязнения изменяется структура биоценозов и качество вод, вода становится маслянистой на ощупь, снижается рекреационная ценность водоемов. При массовом развитии вида отмечаются аллергические реакции у купающихся.

До конца прошлого столетия рафидофитовые водоросли были редкими в водоемах Северо-Запада России. Однако, с середины 90-х гг. прошлого столетия *Gonyostomum semen* отмечается в значительных количествах в некоторых водоемах южной Карелии [6,4,9], кислых озерах Вологодской области [5], и в ряде других регионах [2]. В реках бассейна Ладожского озера *Gonyostomum* встречается с середины 90-х гг. прошлого столетия [7-9]. Массовое развитие вида отмечено в озерах Валаама и в ряде его прибрежных бухт [3]. Большинство притоков Ладоги испытывают интенсивное антропогенное воздействие, что ведет к изменению их гидрохимии и

ухудшению качества воды. Трансформируются и биоценозы, населяющие притоки, поступающие с их водами в озеро и оказывающие влияние на его экологическое состояние. Все это вызывает необходимость мониторинга состояния рек бассейна Ладоги и происходящих в них процессов эвтрофирования и загрязнения, в том числе биологического за счет экспансии инвазивных видов.

Гидрохимические наблюдения на притоках Ладожского озера проводятся Институтом озероведения РАН с 60-х гг. прошлого столетия [7]. Исследования фитопланктона рек бассейна Ладожского озера были начаты нами в 1995 г. В 1995-1998 гг. они проводились преимущественно летом. С 2000 г в программу исследований были включены малые реки, пробы отбирались 2-4 раза в год. В данной статье гидрохимическая характеристика и оценка состояния фитопланктона 21 притока Ладожского озера приводится преимущественно по результатам исследований 2000-2005 гг., кроме того приведены данные наблюдений 2011-2014 гг. Количественные пробы фитопланктона отбирали с поверхности, фиксировали раствором Люголя, концентрировали отстаиванием и просчитывали в камере Нажотта [7].

Главные притоки Ладожского озера – Волхов, Свирь и Вуокса (Бурная и старое русло) обеспечивают 80 % суммарного притока воды в озеро. Реки собственного водосбора озера, на долю которых приходится 14 % стока, можно разделить на четыре группы: реки северного побережья (Хиитолан, Иийоки, Мийнола, Тохма, Янис, Уксун), реки северо-восточного побережья (Тулема, Видлица, Тулокса, Олонка), реки юго-восточного побережья (Паша, Оять, Сясь) и малые реки южного и юго-западного побережья (Назия, Лава, Морье, Авлога). Общими чертами химического состава воды рек бассейна Ладожского озера, обусловленными природными факторами, являются низкая минерализация воды ( $\Sigma_{и}$ ), гидрокарбонатно-кальциевый состав, превышение сульфатных ионов над хлоридными [7]. Минимальной  $\Sigma_{и}$  характеризуются реки северного и северо-восточного побережья, водосборы которых сложены кристаллическими породами. Средняя  $\Sigma_{и}$  в большинстве рек ниже 50 мг/л. Повышенная  $\Sigma_{и}$  свойственна воде юго-восточных и южных рек, водосборы которых сложены осадочными породами. Наиболее высокой  $\Sigma_{и}$  выделяются реки Сясь и Назия, где средняя  $\Sigma_{и}$  около 100 мг/л, а максимальная – 200-300 мг/л.

Для большинства рек северного и северо-восточного побережья в половодье и дождевые паводки характерна слабокислая реакция среды, в межень – близкая к нейтральной. рН воды юго-восточных и южных рек в межень достигает 8-8.5 [7]. Цветность воды рек изменяется от 25-45° в межень и до 350-360° во время дождевых паводков. Наименьший диапазон цветности отмечен для северных рек. Содержание органического углерода в притоках северного и северо-восточного побережья составляет 7-13 мг, в остальных – 10-45 мг С /л.

Природные особенности ладожского водосбора обуславливают низкую естественную концентрацию соединений фосфора в воде большинства рек. В то же время, хозяйственное освоение территорий привело к росту содержания фосфора в реках, водосборы которых испытывают интенсивное антропогенное воздействие. При концентрации общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) в воде северных рек 8-60 и минерального ( $P_{мин.}$ ) 1-40 мкг/л в сильно загрязненной р. Иийоки концентрация достигает 350 и 300 мкг/л соответственно [7]. Из рек северо-восточного побережья наименее подвержена антропогенному воздействию р. Тулема, ( $P_{общ.}$  – 10-30,  $P_{мин.}$  – 1-15 мкг/л). В воде рек Тулокса и Олонка, характеризующихся высокой освоенностью водосбора, содержание  $P_{общ.}$  – 40-140,  $P_{мин.}$  – 20-90 мкг/л. Широкий диапазон колебаний содержания фосфора отмечен в воде рек Паша, Оять и Сясь:  $P_{общ.}$  – 20-100,  $P_{мин.}$  – 5-60 мкг/л, а наиболее высокие концентрации – в малых реках южного и юго-западного побережья, особенно, р. Авлоге, где содержание  $P_{общ.}$  достигает 3, а  $P_{мин.}$  – 1.5 мг/л. Концентрации общего азота в воде большинства рек находятся в пределах 600-900 мкг N/л, и только в воде рек южного и юго-западного побережья они чрезвычайно высоки: в Назии – около 2, в Авлоге – 4.9-7.3 мг N/л, что, безусловно, связано со сбросом сточных вод, т.к. преобладающей формой азота является органическая.

В фитопланктоне изученных рек обнаружено 503 вида водорослей [7,8]. Наиболее разнообразны *Bacillariophyta* (210), *Chlorophyta* (145), *Cyanophyta* (38) и *Chrysophyta* (31). Разнообразие речного фитопланктона определяется размером самих рек и размером озер, из которых они вытекают. Максимальное число видов (176-183) отмечено в Олонке и Видлице, а минимальное (54-46) - в малых реках. По числу видов во всех реках преобладают зеленые

водоросли, преимущественно, хлорококковые. Диатомовые и сине-зеленые водоросли более разнообразны в крупных реках. В реках северного и северо-восточного побережья (Уксун, Тулема) сине-зеленые практически отсутствуют. Единственный вид рафидофитовых водорослей *Gonyostomum semen* найден во всех реках кроме Хиитолана и Лавы. При этом максимального развития во всех реках *Gonyostomum* достигал в летне-осеннем планктоне. Наибольшие величины численности за период с 2000 по 2005 гг. отмечены в Тулеме, Тулоксе, Морье, Иййоки, Мийноле и старом русле Вуоксы. Все эти реки характеризуются низкой минерализацией, высокой цветностью и связаны с озерно-речными системами южной Финляндии, где *Gonyostomum* широко распространен.

Средняя биомасса летнего фитопланктона исследованных притоков колебалась от 0.2 до 4.3 мг/л. Наиболее продуктивен фитопланктон р. Морье, который по уровню биомассы можно считать эвтрофным, а Олонку, Тулоксу, Видлицу, Иййоки и Вуоксу (1.2-2.3 мг/л) – мезотрофными [9,12]. Наиболее низкие величины биомассы характерны для рек Уксун, Тулема и большинства малых северных рек (0.2-0.6 мг/л), которые можно считать олиготрофными. Тем не менее, и в этих реках *Gonyostomum* составляет значительную часть общей биомассы фитопланктона. Именно в этих реках *Gonyostomum semen* играет наибольшую роль в общей биомассе фитопланктона.

Прослеживается прямая связь между средней за сезон биомассой фитопланктона и содержанием фосфора в реках, хотя и не такая четкая, как для озер. Важнейшие факторы формирования речного фитопланктона – его состав и продуктивность в истоке реки, характер и скорость течения, наличие по ходу реки озер или расширенных плесов с замедленным водообменом. В большинстве притоков по биомассе в течение сезона доминировали центрические диатомеи, криптофитовые и зеленые водоросли. В летне-осеннем планктоне рек восточного побережья зачисительную роль играли рафидофитовые, которые ранее в бассейне Ладоги не отмечались. На протяжении периода исследований наблюдалось постепенное распространение *Gonyostomum* на водосборе Ладоги (таблица 1).

Таблица 1

Численность *Gonyostomum semen* (кл./л) в летнем планктоне притоков Ладоги в разные годы

Реки	годы								
	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2011	2014
Бурная			500	1000			5000	3000	6000
Янис				500					
Уксун	500	2500	3000		3500	1000	2000	2000	1000
Тулема	100	1000	1500	2000	4000	3000	6000	4000	5000
Видлица		3500	2500	1500	1500	1500	7000	2000	1000
Тулокса	1000	5000	14000	16500	3500	13000	7000	22000	3000
Олонка		1000	1500	2400	2500	500	4000	4000	16000
Свирь			1500	7000	11000	5500	1000	2000	1000
Оять			1500		1500	4500		1000	3000
Паша			1500		500	4500	2000		1000
Сясь	500								
Волхов							5000	1000	1000
Вуокса			4000	5000	31000	4000	14000	2000	6000
Морье					37000	45000	46000		50000
Авлога					1000		1000	1000	1000
Хиитолан									
Иййоки						16000			1000
Мийнола					10000		500		15000
Тохма					3000		2000	1000	1000
Лавя									
Назия							3000		1000



В конце 1990-х гг. вид регистрировался только в 5 реках. В небольших количествах он отмечался в северо-восточных притоках Уксун Тулема, Видлица, Тулокса и Олонка с рН от 5.2 до 6.8 и цветностью выше 150° Pt/Co шкалы. В настоящее время в большинстве притоков *Gonyostomum* является обычным компонентом летнего планктона, достигая максимальной численности в июле-августе. В летнем фитопланктоне *G. semen* составляет до 25 % биомассы фитопланктона в реках восточного побережья, до 30-40 % в северных, в фитопланктоне крупных рек – не более 10 %. Причем, за период наблюдений роль этого вида в планктоне притоков год от года возрастала. Наибольшая численность вида – до 40-50 тыс.кл./л отмечена в гумифицированных притоках с повышенным содержанием фосфора, прежде всего р. Морье ( $P_{\text{общ}} - 0.15 \text{ мг/л}$ ), где он давал от 50 до 80 % общей биомассы фитопланктона.

Наблюдения 2011 и 2014 гг. показали, что в планктоне притоков северного побережья – Иййоки, Мийноле, Тулеме и Тохме, рафидофитовые водоросли доминируют, составляя от 42 до 87 % общей биомассы. Особенно возросла роль *Gonyostomum* в р. Мийноле, где суммарная биомасса фитопланктона достигла 6 мг/л. В Ояти *Gonyostomum* составлял 21 %, в Тулоксе – 11 %, в Волхове – до 4 % общей биомассы. В Олонке развитие *Gonyostomum* (27 %) обусловило максимальное значение биомассы фитопланктона за весь период наблюдений – 8.6 мг/л. Существенную долю *Gonyostomum* составлял в биомассе планктона рек Бурной, Вуоксы и Тулемы (18-46 %).

Многофакторный анализ зависимости структуры фитопланктона исследованных рек от факторов среды показал, что численность рафидофитовых водорослей связано с размером рек, цветностью, и содержанием фосфора [12]. Ординация методом главных компонент выявила преимущественное развитие *Gonyostomum* в малых и средних реках с низкой минерализацией, повышенной цветностью и повышенным содержанием фосфора, т.е. подтверждается стимулирующая роль эвтрофирования в распространении *Gonyostomum semen* в водоемах Северо-Запада России.

#### Литература:

1. Водоросли. Справочник. / Вассер С. П., Кондратьева Н. В., Масюк Н. П. и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 608 с.
2. Ветрова З. И. Представители Raphidophyta в водоемах Советского Союза // З. И. Ветрова, А. Г. Охалкин / Ботанический журнал. – 1990. – Т. 75, № 5. – С. 631-636.
3. Воякина Е. Ю. Влияние факторов среды на динамику показателей *Gonyostomum semen* в разнотипных озерах Валаамского архипелага / Е. Ю. Воякина // Актуальные проблемы современной альгологии: Матер. IV Межд. конф. – Киев, 2012. – С. 63-64.
4. Комулайнен С. Ф. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология / С. Ф. Комулайнен, Т. А. Чекрыжева, И. Г. Вислянская. – Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. – 78 с.
5. Корнева Л. Г. Экология массового развития рафидофитовых водорослей / Л. Г. Корнева // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния пресных вод / под ред. И. Л. Пыриной. – Ярославль, 1996. – С. 48-53.
6. Никулина В. Н. Особенности фитопланктонных сообществ световодно-ацидных и гумифицированных озер Южной Карелии В. Н. Никулина // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий / Под ред. А. Ф. Алимова. – Труды ЗИН РАН. – СПб., 1997. – Т. 272. – С. 29-45.
7. Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре биоценозов / Отв. ред. И. С. Трифонова. – СПб.: «Лема», 2006. – 130 с.
8. Трифонова И. С. Видовой состав и биомасса фитопланктона притоков Ладожского озера и реки Невы / И. С. Трифонова, А. Л. Афанасьева, О. А. Павлова // Ботанический журнал. – 2001. – Т. 86, № 11. – С. 10-20.
9. Трифонова И. С. Оценка трофического состояния притоков Ладожского / И. С. Трифонова, О. А. Павлова // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 6. – С. 732-741.

10. Cronberg G. Mass Development of the Flagellate *Gonyostomum semen* (Raphidophyceae) in Swedish Forest Lakes / G. Cronberg, G. Lindmark, S. Bjork // *Hydrobiologia*. – 1988. – Vol. 161. – P. 217-237.
11. Lepisto L. J. The occurrence of *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing in Finnish lakes // L. Lepisto, S. Antikainen, J. Kivinen // *Hydrobiologia*. – 1994. – Vol. 273. – P. 1-8.
12. Trifonova I. Phytoplankton as an indicator of water quality in the rivers of the Lake Ladoga basin and its relation to environmental factors // I. Trifonova, O. Pavlova, A. Rusanov // *Arch. Hydrobiol. Suppl.* – 2007. – Bd. 167, N. 3-4. – S. 527-549.
13. Willen E. Summer phytoplankton in 73 nutrient-poor Swedish lakes. Classification, Ordination and choice of long-term monitoring objects // E. Willen, S. Hajdu, Y. Pejler // *Limnologica*. – 1990. – Vol. 20. – P. 217-227.
14. Willen E. Dominance patterns of planktonic algae in Swedish forest lakes / E. Willen // *Hydrobiologia*. – 2003. – Vol. 502. – P. 315-324.

### **SPREADING OF POTENTIALLY HARMFUL RAPHIDOPHYTE ALGA IN THE LAKE LADOGA TRIBUTARIES**

Irina Sergeevna Trifonova,  
Doctor of Sciences, Head Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: itrifonova@mail.ru  
Oksana Aleksandrovna Pavlova,  
Ph.D., Senior Researcher.  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
Anna Leonidovna Aphanasieva,  
Researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

*Abstract:* Distribution of raphidophyte alga *Gonyostomum semen* in Lake Ladoga inflows is analysed on the data of long-term researches. This species firstly met in some Lake Ladoga inflows in the middle of the 90th of the last century now is found in summer-autumn plankton of almost all rivers of the basin. Researches of the recent years have revealed noticeable increase of the *Gonyostomum* number and its role in total phytoplankton biomass of the majority rivers. Our data confirm also that mass development of *Gonyostomum* can be related to anthropogenous eutrophication of water-bodies with high water colour.

*Keywords:* Raphidophyta, *Gonyostomum*, Lake Ladoga inflows eutrophication, spreading

## МОНИТОРИНГ ЧИСЛЕННОСТИ ЛАДОЖСКОЙ КОЛЬЧАТОЙ НЕРПЫ (*PUSA HISPIDA LAGODENSIS*) В ШХЕРНОМ РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Владимир Иванович Уличев,  
младший научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

E-mail: [ulich@inbox.ru](mailto:ulich@inbox.ru)

Дина Сергеевна Дудакова  
к.б.н., научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)

*Аннотация:* Представлена методика наблюдений за морскими млекопитающими с помощью беспилотного летательного аппарата. Многоцелевое использование БПЛА дает возможность проводить различные исследования кольчатой нерпы; безопасно вести учет численности и наблюдать животных в их естественной среде обитания. Данная методика актуальна для изучения береговых залежек кольчатой нерпы, как линных, так и релаксационных, а также при соответствующей модификации может применяться для проведения учетов численности тюленей на льду на более обширных акваториях. В перспективе возможно использование БПЛА, с целью верификации данных дистанционного зондирования Земли, полученных с борта самолёта или спутника (ледовая обстановка, скопление животных на акватории Ладожского озера, состояние береговых лежбищ и др.).

*Ключевые слова:* кольчатая нерпа, Ладожское озеро, шхерный район, численность животных, линные релаксационные залежки, БПЛА

### Введение

При рациональном использовании биологических ресурсов Ладожского озера необходимо учитывать продуктивность сообществ водоёма: численность (биомассу) гидробионтов на каждом трофическом уровне; их взаимодействие с другими группами организмов на всех уровнях. Ладожская нерпа является консументом высшего порядка, т.е. занимает верхний трофический уровень в экосистеме озера, и тем самым замыкает пищевую цепь. Поэтому при оценке степени воздействия кольчатой нерпы на популяции рыб Ладожского озера необходимо знать количество животных (нерп), а также регулярно проводить мониторинг их численности [1-2]. Ладожская нерпа (*Pusa hispida ladogensis*) - эндемичный подвид кольчатой нерпы, занесенный в Красную Книгу Российской Федерации (рис.1.).

Малое количество современных данных по биологии данного подвида и состоянию его популяции говорит о необходимости проведения комплексных исследований для восполнения имеющихся пробелов в научном знании. Нерпа является пагетодным видом, но значительная часть годового цикла животного связана с образованием скоплений на суше. Эти скопления формируются как непосредственно по берегам озера и островов, так и на отдельных камнях («лудах») главным образом в северной части Ладожского озера. Кроме того, северный (шхерный) район озера также используется нерпой в сезон размножения.



*Рис.1. Ладожская кольчатая нерпа (Pusa hispida ladogensis), май 2016 г.  
(фото Уlicheva В.И.).*

### **Методы исследований**

Анализ расположения и состава линных и релаксационных залежек, а также мест размножения ладожской нерпы впервые осуществлен с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА), оснащенного видео аппаратурой [5]. Авторами была применена ранее отработанная методика наблюдений за природными объектами и явлениями с помощью БПЛА [4]. Многоцелевое использование БПЛА дает возможность проводить различные исследования кольчатой нерпы; вести учёт их численности [3] и наблюдать за поведением животных в их естественной среде обитания [5].

Весной 2015-16 гг. сотрудниками Института озераедения были проведены экспедиции с целью мониторинга численности и изучения поведения ладожской нерпы. Район проведения исследований – материковая часть и острова шхерного района Ладожского озера от островов Пеллотсаари и Райпатсаари до п-ва Хунукка (рис.2).



*Рис.2. Схема размещения района исследований. Ладожское озеро, район шхер весна 2015г.*

### **Результаты исследований**

Согласно проведенным с судна подсчетам, общее число животных на пройденном маршруте 25 и 26 апреля 2015 года составило более 135, а на тех участках, где параллельно проводился учет с камеры БПЛА – 103 головы. На видеокамеру с БПЛА (6 запусков) удалось зафиксировать









кольчатую нерпу в количестве 53 голов, часть животных находилась на береговом припайном льду. На ледовой кромке были заметны места лежек животных, следы их перемещения, лунки. В следующий сезон 5 мая 2016 года в районе островов Пеллотсаари, Ристисаари и Лусиккайнлуото учёт животных проводился в первой половине дня, как и в предыдущем году, но льда уже не было. Залежки нерпы зафиксированы на лудах и каменистых отмелях. Животные располагались небольшими разновозрастными группами, также были отмечены одиночные особи. В течение одного утра (с 10-00 до 12-00) на семи участках наблюдений удалось зафиксировать кольчатых нерп в количестве 231, в том числе животных с помощью БПЛА (4 запуска) - 101 (таблица 1). Такое большое количество животных учтено благодаря совершенствованию методики наблюдений, в частности аппаратуры (видео «от первого лица в режиме on line»), а также точного определения мест залежек нерпы (помощь рыбаков). Следует заметить, что не все кольчатые нерпы в данном районе могли быть учтены одновременно, так как во время съёмки часть животных находились в воде или перемещались между соседними островками. С целью усовершенствования оценки численности ладожской нерпы необходимо применять различные методы подсчёта животных в комплексе: с помощью БПЛА, малой авиации (подсчёт тюленей на льду), данных спутников Земли (космические снимки), мечения тюленей (использование датчиков спутниковой телеметрии ДСТ), математического моделирования.

Таблица 1

Численность кольчатой нерпы в местах обнаружения залежек по данным визуального наблюдения с борта судна и с БПЛА, май 2016 г

Участок наблюдения	Местонахождение, координаты	Дата и время	Численность нерпы (голов) при подсчетах:	
			с судна	с БПЛА
Участок 1	Залив Халлинселька северная часть о. Ристисаари 61°37,150' N 31°05,426'	05.05.16 / 10.03	17	9
Участок 2	о. Ристисаари (северная часть) 61°36,969' N 31°05,204'	05.05.16 /10.19	9	Не запускали
Участок 3	Акватория между о. Селькялуодот и о. Лусинкайнлуото 61°37,111' N 31°04,552'	05.05.16 / 10.22	41	20
Участок 4	Акватория между о. Ристисаари о. Райпатсаари и о. Лусиккайнлуото 61°36,616' N 31°02,725'	05.05.16/ 10.50	6	Не запускали
Участок 5	На юг до мыса о. Райпатсаари 61°36,357' N 31°01,415'	05.05.16 / 11.25	50	Не запускали
Участок 6	восточная часть о. Лусиккайнлуото 61°36,204' N 31°01,077'	05.05.16 /11.31	-	65
Участок 7	Северный мыс о. Лусиккайнлуото (проверка реакции нерп на полёт БПЛА) 61°36,326' N 31°00,593'	05.05.16 /12.00	7	7
Общая численность			130 (с 4 участков)	101 (с 7 участков)



Учас-ток	Фото с судна (Уличев В.И. Дудакова Д.С.)	Видеозахват с БПЛА (Дудаков М.О.)
Уч. 2		
Уч. 3		
Уч. 5		
Уч. 8		

*Рис. 3. Фотографии и видеофрагменты съемок с судна и с БПЛА участков, охваченных аэровидеосъемкой, апрель 2015 г.*

Помимо подсчета численности животных, наблюдения с БПЛА позволяют проводить этологические исследования, например, отслеживать перемещения нерпы в воде и под водой при относительно высокой прозрачности воды. Кроме того, по видеоматериалам, отснятым на камеру БПЛА, проводился анализ поведения животных на залежках и, в частности, их реакции на источники беспокойства. Был проведен эксперимент, на предмет воздействия полёта БПЛА, (как фактора беспокойства) с целью выявления различных поведенческих реакций животных. Следует

отметить, что БПЛА при различных режимах эксплуатации звучит достаточно громко. Аппарат опускался на небольшую высоту (порядка 10 м над водой) над местом скопления тюленей в воде (рис. 4.). Активной реакции избегания тюленей отмечено не было. Животные, находившиеся на твёрдом субстрате (прибрежные камни, лёд) при появлении низко летящего аппарата старались как можно быстрее оказаться в воде.



*Рис.4. Съёмка скопления нерпы с БПЛА при низких высотах.  
(фото Уличева В.И.).*

### **Выводы**

1. Показана возможность применения БПЛА при учете численности и изучения поведения кольчатой нерпы на линных залежках. Продемонстрировано, что при высоте полетов БПЛА более 60-80 метров, животные не сходят в воду, что позволяет получить достоверные данные об их численности.

2. Предложенная методика актуальна для изучения береговых залежек кольчатой нерпы, как линных, так и релаксационных, а также при соответствующей модификации может применяться для проведения учетов численности тюленей на льду на более обширных акваториях.

3. Возможно использование БПЛА, с целью верификации данных дистанционного зондирования Земли, полученных с борта самолёта [2] или спутника (ледовая обстановка, скопление животных на акватории Ладожского озера, состояние береговых лежбищ и др.).

В перспективе будет проведен комплексный анализ качества местообитаний кольчатой нерпы в северной части Ладожского озера. Планируется сделать заключения о полноте и специфике использования потенциально пригодных для залежек мест кольчатой нерпой. Будут подробно охарактеризованы возможные факторы беспокойства, приводящие к смещению мест залежек тюленей в долгосрочном периоде времени. Для этого необходимо:

1. Оценить численность и распределение ладожской кольчатой нерпы в шхерном районе Ладожского озера и на островах Валаамского архипелага в различные сезоны года.

2. Осуществить картирование распределения антропогенной нагрузки на береговые зоны шхерного района (включая картирование зон любительского подледного рыбного лова, коммерческие рыболовные участки, береговые туристические стоянки, прибрежное строительство, свалки и пр.).

3. Выявить участки, потенциально пригодные для залегания кольчатой нерпы, и оценить степень их используемости животными.

4. Используя архивные данные, охарактеризовать гидрологические особенности и продуктивность шхерного района озера.
5. Дать оценку качества местообитания кольчатой нерпы в районе исследования и определить основные источники негативного воздействия.

#### Литература:

1. Антонюк А. А. Оценка общей численности популяции тюленя *Pusa hispida ladogensis* Ладожского озера // Зоологический журнал. - 1975, т.54, № 9. – С. 1371-1377.
2. Верёвкин М. В., Высоцкий В. Г., Труханова И. С., Сагитов Р. А. Результаты авиационного учёта ладожской кольчатой нерпы (*Pusa hispida ladogensis*) // Морские млекопитающие Голарктики: Тезисы докладов Седьмой международной конференции, Суздаль.- 2012. – С. 148-151.
3. Медведев Н. В., Сибиля Т., Верёвкин М. В. Характер распределения ладожской нерпы *Pusa hispida ladogensis* по акватории озера в ледовый сезон // Морские млекопитающие Голарктики: Тезисы докладов Четвёртой международной конференции, Санкт-Петербург.- 2006. – С. 358-360.
4. Уличев В. И., Чичкова Е. Ф., Дудаков М. О. Методика оценки экологического состояния водосбора Ладожского озера на основе космических съёмок и тестовых наблюдений с помощью беспилотного летательного аппарата // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы 4-ой Всероссийской конференции. – Москва. - С. 454-456.
5. Уличев В. И., Дудакова Д. С., Дудаков М. О., Труханова И. С. Аprobация беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для изучения численности и поведения ладожской кольчатой нерпы (*Pusa hispida ladogensis*) на линных залежках // География: развитие науки и образования: Коллективная монография конференции LXIX Герценовские чтения. - Санкт-Петербург.- 2016. – С. 189 - 193.

### **MONITORING THE NUMBER OF LADOGA RINGED SEAL (*Pusa hispida ladogensis*) IN SKERRY AREAS OF LAKE LADOGA**

Vladimir Ivanovich Ulichev  
Junior researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [ulich@inbox.ru](mailto:ulich@inbox.ru)  
Dina Sergeevna Dudakova  
Ph.D, researcher  
Institute of Limnology Russian Academy of Sciences  
E-mail: [judina-d@yandex.ru](mailto:judina-d@yandex.ru)

*Abstract:* We present the shooting procedure of marine mammals' observation using UAV. Multi-purpose use of UAV allows making all kinds of studies; maintaining accounting its enumeration with safety and observing animal's behavior in natural habitat. The method we propose suits for study of ringed seals coastal prones. It is possible to use UAV for remote sensing from aircraft or satellites data verification. In the future, it's possible to use the UAV in order to verify the data of remote sensing of the Earth received from the aircraft or satellite (ice conditions, the concentration of animals in the waters of Lake Ladoga, the state of coastal rookeries and others.).

*Keywords:* ringed seal, Ladoga lake, skerry area, abundance of animals, moulting grounds, the UAV



## О ВНУТРИВЕКОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ ВОДЫ ВЕЛИКИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ

Николай Николаевич Филатов,  
чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН  
*E-mail:* [nfilatov@rambler.ru](mailto:nfilatov@rambler.ru)  
Татьяна Юрьевна Выручалкина,  
научный сотрудник  
Институт водных проблем РАН  
[vyruchi@list.ru](mailto:vyruchi@list.ru)

*Аннотация:* Работа посвящена исследованию закономерностей внутривековой изменчивости уровня воды Ладожского и Онежского озер - Великих озер Европы (ВОЕ). Для оценки общих глобальных и региональных особенностей выполнен сравнительный анализ изменений уровня воды Ладожского, Онежского озер и других великих озер Мира.

*Ключевые слова:* озера, уровень воды, водный баланс, климат, внутривековая изменчивость

### Введение

До настоящего времени не решены проблемы долгосрочного (внутривековые масштабы) прогноза уровня воды великих озер мира. Знание закономерностей, прогноз уровня воды озер имеет важное значение для экономики стран, расположенных на водосборах великих озер для обеспечения водного транспорта, гидроэнергетики, питьевого и промышленного водоснабжения, добычи биоресурсов, рекреации, сброса вод от рассеянных и точечных источников. При значительных внутривековых колебаниях уровня озер, достигающих для ряда озер нескольких метров, экономика регионов вынуждена постоянно приспосабливаться к изменяющемуся гидрологическому режиму, причем ежегодные экономические потери могут достигать десятков млрд. дол.

Изучению закономерностей изменчивости уровня воды Ладожского и Онежского озер были посвящены работы Ладога, (2013), А.М. Догановского (1999), В.А.Румянцева, Ю.А.Трапезникова (2008), Н.Н.Филатова, И.В. Филатовой (1990), [5,2,10,15] и др. исследователей (<http://hydrolare.net/database.php>)[22]. Однако долгосрочный прогноз изменений уровня этих озер остается актуальной задачей для надежного обоснования разрабатываемого закона об охране Ладожского и Онежского озер.

### 1. Материалы и методы.

Для анализа закономерностей внутривековых колебаний уровня исследуемых озер использовались среднемесячные и среднегодовые ряды наблюдений за уровнем воды, элементами водного баланса (ЭВБ) и климатическими параметрами с середины XIX века до 2015 г. Был выполнен вероятностный анализ данных длительных наблюдений климатических и гидрологических характеристик озер, среднемесячных и среднегодовых значений по методике, представленной в работах [1,9].

Для оценки вклада внутривековых колебаний уровня воды в спектр колебаний уровня Ладожского и Онежского озер для широкого диапазона временных масштабов от часов до десятков лет был рассчитан т.н. “склеенный” спектр по методике [9] рис. 1.

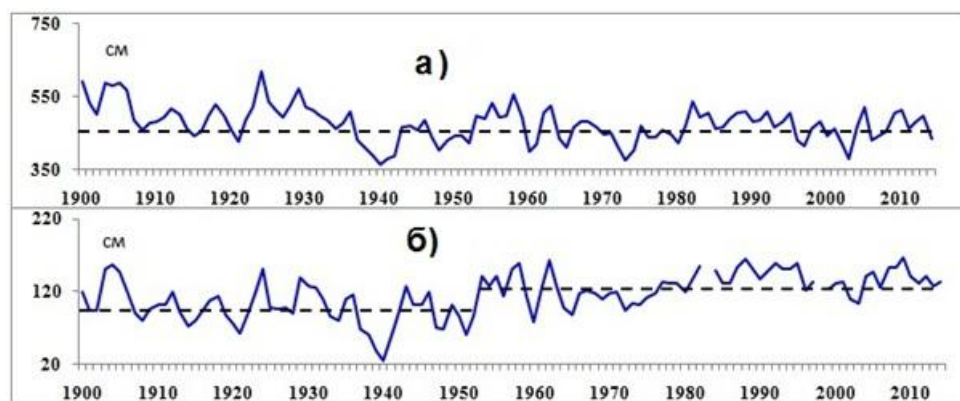


Рис. 1. «Склеенный» спектр колебаний уровня.

Этот спектр показывает, что наибольший вклад (более 50%) в общую изменчивость уровня воды озера вносят многолетние и сезонные флуктуации уровня, по сравнению с синоптическими, сгонно-нагонными, бризовыми, баротропными сейшевыми флуктуациями.

Были выполнены оценки изменчивости элементов водного баланса уровня озер по спектрам с использованием как параметрического, так и непараметрического спектрального анализом [1]. Непараметрическим методом среднемесячных и среднегодовых данных продолжительностью более 100 лет были получены оценки нестационарных (частотно-временных и двухчастотных) спектров уровня и ЭВБ с выполнением требований их эффективности, состоятельности и не смещенности [11.] По этим спектрам оценена доля дисперсии колебаний уровня воды Ладожского озера с масштабами более 30 лет, которая изменяется во времени в разные отрезки времени от 28 до 54 %. Доля дисперсии колебаний уровня с временными масштабами около 5-7 лет в общую изменчивость составляет для Ладожского озера 23%. Вклад колебаний с частотой, соответствующей одному году не превосходит 20 % при среднем значении для Ладожского озера 12%.

Результаты вероятностного анализа стока рек Волхова, Vuоксы, Свири, Невы показали, что для них характерны такие же колебания, как и для уровня Ладожского озера [13]. Анализ взаимной связи среднемесячных колебаний уровня с атмосферными осадками показал, что флуктуации уровня озера запаздывают по отношению к изменениям атмосферных осадков на нескольких месяцев. Подобная закономерность получена для статистических связей атмосферных осадков с суммарным притоком и стоком р. Невы. Для Онежского озера после создания на них гидротехнических сооружений в 1950-х годах произошли нарушения внутригодовой связанности (коррелированности) ЭВБ и уровня [15]. Изменилась связь уровня с суммарным притоком. Обнаруженные нарушения внутригодовых связей ЭВБ и уровня озер являются важными при прогностических расчетах уровня режима, а также их необходимо учитывать при планируемом строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений.

## 2. Результаты исследований внутривековой изменчивости климата и уровня озер

Анализ многолетних климатических данных с 1900 по 2015 г. для водосборов Ладожского, Онежского озер, выявил наличие положительных линейных трендов годовых температур поверхностного слоя атмосферы (ТПА) и осадков. В качестве климатической нормы использовались среднее многолетнее значение за 1961–90 гг.

На водосборе ВОЕ с конца 80-х годов XX века наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой ТПА [3,6]. Наиболее значимые изменения ТПА для водосборов Ладоги и Онего характерны для зимних месяцев. В изменчивости ТПА отмечаются квазициклические колебания с временными масштабами более 30 и нескольких лет. Отметим также, что за исследуемый период 1990-2015 гг. отмечается заметный положительный тренд в температуре приповерхностного слоя воды (ТПВ). Для Ладожского озера увеличение ТПВ составляло для июня-октября от 1.5. до 4.0 °С, а для Онежского – от 1.5 до 2.4 °С. За 100 лет наблюдений в среднем на две недели увеличилось число дней, когда Онежское озеро свободно ото льда [14]. В колебаниях стока рек,

впадающих в Ладожское (реки Свирь, Волхов, Сясь, Вуокса) и Онежское озеро (реки Шуя, Суна, Водла, Андома), нет заметного тренда.

В работе [14] сравнивались изменения климата на водосборах ВОЕ с изменениями климата на водосборах оз. Байкал, Каспия, а также Великих американских озер. Общим для изменений климата на водосборах этих озер является наличие положительного тренда среднегодовой ТПА как за весь рассматриваемый период с 1990 по 2015 гг., но при этом характер изменчивости климатических характеристик на водосборах рассматриваемых озер значительно различается: эти изменения не являются когерентными, что обусловлено влиянием региональных факторов. Важно отметить, что последние полторы декады на водосборах исследуемых озер отмечается период т.н. «замедления» потепления, который характерен и в глобальном масштабе [19]. Далее рассмотрим внутривековую изменчивость уровня воды и ЭВБ исследуемых озер. На рис. 1. показаны графики изменений уровня крупнейших водоемов Евразии с 1900 по 2014 гг.

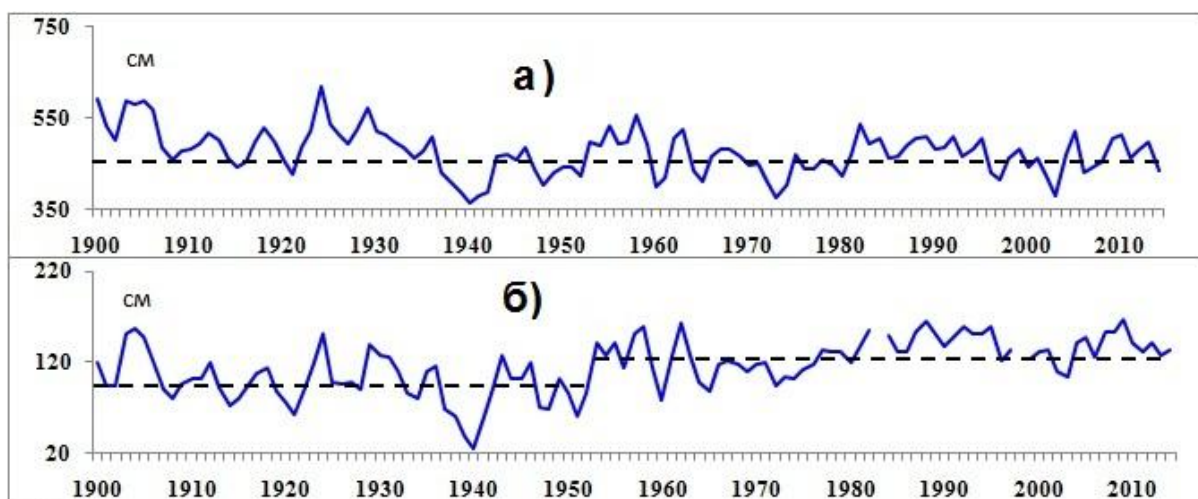


Рис. 2. Многолетние изменения среднегодовых значений уровня воды в озерах: Ладожском (а) и Онежском озерах (б), 1900–2015 гг. Тренды показаны пунктирной линией. Для Онежское озера тренды рассчитаны для периода до и после регулирования режима.

Гидрологический режим Ладожского озера не зарегулирован (отметим, что режим ряда рек, впадающих в озеро, регулируется), а Онежское озеро в 1953 г. было преобразовано в Верхне-Свирское водохранилище после того, как на р. Свирь была построена ГЭС. Средний многолетний уровень воды в Онежском озере после зарегулирования (с 1953 г.) возрос с 98 см до 130 см над нулем поста. До зарегулирования уровня озера его колебания варьировали в пределах 24–160 см, а после – 78–168 см. Статистическая обработка ряда данных о годовом притоке в Онежское озеро показала, что за данный период годовой приток изменялся в значительных пределах – от 9.47 км<sup>3</sup> или 147 мм слоя (1940 г.) до 27.6 км<sup>3</sup> или 521 мм слоя (1962 г.) – и составлял в среднем 17.1 км<sup>3</sup> за весь период, что соответствует 346 мм слоя стока [14].

В структуре водного баланса Онежского и Ладожского озер приток с водосбора играет ведущую роль. Его доля в приходной части многолетнего водного баланса составляет более 70 %, что в три раза превышает долю осадков на зеркало озер [4,7]. В маловодные годы его доля уменьшается до 65 % (1960 г.), в многоводном 1962 г. речной приток составлял 81% общего прихода. Доля осадков изменяется от 35 (в маловодном году) до 19% (в многоводном году). Можно констатировать, что во всех циклах в приходной части водного баланса доля притока достигает 83–89%, а доля осадков на зеркало 17–11%. В расходной части сток из озера составляет 90–94% и 10–6% приходится на испарение. Различие фазовых балансов состоит в том, что в маловодную фазу по сравнению с многоводной происходит сокращение объема притока, стока и осадков с незначительным увеличением испарения. Колебания уровня воды Ладожского и Онежского озер имеют коэффициент корреляции +0.51, когерентность основных составляющих 0.90, а разность их фаз близка к нулю, т.е. эти флуктуации квазисинхронны (рис. 2). Временной

ход флуктуаций уровня этих озер когерентен, за исключением периода подъема уровня Онежского озера в середине 50-х годов прошлого века. Дисперсия колебаний уровня воды озер была существенно выше до середины XX в. по сравнению с таковой для последующего периода.

Для прогноза многолетних изменений уровня Ладоги и Онега были созданы адекватные вероятностные модели и даны прогнозы внутривековых изменений [10,13]. Сезонные изменения уровня Онежского озера более сглаженные, чем Ладожского, за счет регулирования его гидрологического режима Верхне-Свирской ГЭС. Квазисинхронный характер внутривековых изменений уровня Ладожского и Онежского озер обусловлен в первую очередь одинаковыми особенностями изменений климата на водосборах этих озер (рис. 1). Различия же изменений уровня озер определяются особенностями морфометрии озер и водосборов, характером антропогенного воздействия, обусловленного в основном гидротехническим строительством.

Представляет интерес сравнить закономерности изменчивости уровня воды Великих озер Европы и Северной Америки для выявления общих глобальных и региональных закономерностей колебаний уровня воды. Для Великих Американских озер (ВАО) использовались наиболее надежные базы данных измерений уровня воды с 1918 г. [23].

На водосборе ВАО с начала 20-го века отмечается тенденция повышения ТПА. В изменениях ТПА за периоды 1900–1930, 1930 по 1980 гг. отмечается медленный тренд относительного похолодания на 0.5 °С., а затем периоды потепления [16]. За последние 100 лет потепление на водосборе ВАО составило 0.6-0.7 °С. При оценке связей изменений климата были выявлены удаленные связи потепления климата в Арктике и соответствующее похолодание в бассейне ВАО, что влияет на гидрологический режим и функционирование экосистем ВАО [18]. Уровень воды озера Верхнее был зарегулирован с 1914 г., а Онтарио в 1960 г. Однако, при зарегулировании режима диапазон колебаний уровня озера Верхнее и запасы воды мало изменились, а уровень воды оз. Онтарио после зарегулирования был снижен за три десятилетия почти на 50 см, а за счет работы ГЭС значительно сглаживаются естественные флуктуации уровня воды. Первые инструментальные измерения уровня воды ВАО датируются 1840 г. Но они не были приведены к единой системе измерений и поэтому наиболее надежные, приведенные к единой системе измерения, начались на ВАО с 1918 г. По данным расчетов внутривековые колебания уровня озер Сентр-Клер, Мичиган-Гурон и Эри происходят в системе ВАО квазисинхронно, при этом несколько отличаясь от аналогичных для оз. Верхнее и заметно для оз. Онтарио из-за зарегулированности гидрологического режима этих озер, в особенности последние 30 лет.

В изменчивости уровня воды ВАО за период 1918–2015 гг. межгодовые и внутри декадные флуктуации достигают амплитуды до 2 м, но они различаются для разных озер системы. В относительно холодные, влажные годы уровень воды озер возрастает, а в теплые и сухие годы снижается. Относительно низкие уровни воды озер были зафиксированы в конце 1920-х, к середине 1930-х и в середине 1960-х годов. Наиболее высокие уровни воды были вначале 1950-х и начале 1970-х, середине 1980-х и 1990-х. Кроме строительства ГЭС, на ВАО проводились дноуглубительные работы для судоходных каналов. В результате дноуглубительных работ в системе ВАО увеличилась проточность и как результат – уровень озер Мичиган и Гурон понизился на 37 см. С начала XXI века в системе ВАО отмечается период относительно низкого уровня воды, как и на озерах, ВОЕ, что привело к серьезным водохозяйственным проблемам. Наибольший линейный тренд падения уровня отмечается с конца 20-го века по 2015 г., что было обусловлено соотношением осадков и испарения на водосборе.

Из-за влияния антропогенных факторов на систему ВАО оказалось проблематичным выявить вклад естественных климатических изменений в изменчивость уровня воды, поэтому прогноз долговременных изменений уровня воды – до конца не решенная задача для ВАО [21].

Характер внутривековой изменчивости уровня воды ВАО и ВОЕ существенно различается. Не отмечается каких-то общих глобальных тенденций, когерентных квазипериодических многолетних флуктуаций. В работе [14] показано, что во внутривековой изменчивости уровня воды великих озера Евразии и Северной Америки, за исключением Каспия [8], отмечаются крупномасштабные колебания уровня воды с временными масштабами более 30, которые являются квазисинхронными (когерентными) только в своей системе. При этом реакция

гидрологического режима, колебаний уровня воды озер заметно различается, в зависимости от региональных особенностей, влияния антропогенных факторов, площади и характера водосбора. Не найдено общих глобальных закономерностей в изменчивости уровня Великих озер Мира, которые позволили бы улучшить возможности долгосрочного прогноза внутривековых колебаний.

#### **Выводы**

- Реакция гидрологического режима, колебаний уровня воды великих озер Евразии и Северной Америки на изменения климата существенно отличалась в зависимости от региональных особенностей, влияния антропогенных факторов, площади и характера водосбора [14]. К общим закономерностям следует отнести: тенденцию повышения последние 30 лет ТПВ, низкий уровень воды озер, уменьшение толщины ледяного покрова, продолжительности периода ледостава более, чем на 2 недели за последние 100 лет, и внутригодовое перераспределение притока воды с увеличением его доли в осенне-зимний период.
- По данным измерений не было найдено общих глобальных закономерностей в изменчивости уровня Великих озер Мира, которые позволили бы улучшить возможности долгосрочного прогноза внутривековых колебаний.
- Отмечается большая неопределенность долгосрочного прогноза внутривековых изменений уровня вод и изменений экосистем, что важно для планирования экономической деятельности, принятия мер по адаптации к возможным региональным изменениям, разработке мер по рациональному использованию и охране ресурсов озер. Поэтому важной задачей остается совершенствование системы диагноза и прогноза внутривековых и сезонных изменений колебаний уровня воды, гидрологического режима и экосистем великих озер Европы и Северной Америки.

*Благодарности.* Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-17-00740.

#### **Литература:**

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир. 1974. В.1. -288. в. 2. -197 с.
2. Догановский А. М. Влияние климатических вариаций на уровеньный режим озер Северо-запада России / А. М. Догановский, Е. А. Анохина // Тр. РГГМУ. – 1999. – Вып. 121. –С.86-91.
3. Климат Карелии. Изменчивость и влияние на водные объекты / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск. КарНЦ РАН. 2004. 224 с.
4. Ладожское озеро. Атлас / ред. В. А. Румянцев. –Спб: Нестор-История. 2015, 200 с.
5. Ладога. Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. – СПб. Нестор-История. 2013. - 468 с.
6. Назарова Л. Е. Влияние колебаний климата на сток с водосбора Онежского озера // География и природные ресурсы. № 1. 2010. С. 171-174.
7. Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010, 151 с.
8. Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 1-14
9. Рожков В. А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 280 с.
10. Румянцев В. А., Трапезников Ю. А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.
11. Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. С.Петербург, Наука.1991.191 с.
12. Филатов Н. Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 166 с.
13. Филатов Н. Н. Изменение и изменчивость климата восточной Фенноскандии и колебания уровня крупнейших озер Европы. Изд. КНЦ РАН. Петрозаводск. 1997. 141 с.
14. Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А., Назарова Л. Е., Синюкович В. Н. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России. М.МАИК. Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 5. с.1-5.
15. Филатов Н. Н., Филатова И. В. Закономерности изменчивости внешнего водообмена и уровня крупных озер. Труды V Гидрологического Съезда. Л.: Гидрометеиздат. 1990. С.73-81.

16. Andresen J. Hystorical Climate Trends in Michigan and the Great Lakes Region. International Symposium on Climate Change in the Great Lakes Region: Decision Making Under Uncertainty Michigan State University East Lansing, MI 15-16 March, 2007.

17. Angel, J.R., and K.E. Kunkel, The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. Journal of Great Lakes Research, Supplement 2, Vol. 36, 2009.51-58.

18. Brown D. Great Lakes Climate Impacts and Coastal Communities. Michigan State Univ. GLISA. NOAA. 2013. glisa.umich.edu.

19. Hawkins E., Edwards T., McNeall D. Pause for thought // Nature Climate Change. 2014. V. 4. p. 154–156. doi:10.1038/nclimate2150.

20. Gronewold A. D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C.A., Quinn F. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // Climatic Change. 2013. 120: 697–711 DOI 10.1007/s10584-013-0840-2.

21. MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change // ClimaticChange 2013. v. 117 (12). P. 55-67.

22. <http://hydrolare.net/database.php>

23. <http://www.glerl.noaa.gov/pubs/fulltext/2014/20140026.pdf>

## **ABOUT INTRASECULAR VARIABILITY OF WATER LEVEL FLUCTUATIONS OF GREAT LAKES OF THE WORLD**

Nikolaj Nikolaevich Filatov,  
Northern Water problems institute KRC RAS  
E-mail: nfilatov@rambler.ru  
Tat'jana Jur'evna Vyruchalkina  
Water problems institute RAS

*Abstract:* The features of the intrasecular changes in the level of the largest lakes of Russia (Ladoga, Onego) are jointly considered for the basis of the long-term data measured in the 20th–21st centuries. The influence of climate and anthropogenic factors is considered to improve the forecast of the level of lakes.

*Key words:* lakes, water level, water balance, climate, intrasecular variability



## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА ПЕЛАГИАЛИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Юлия Юрьевна Фомина,  
младший научный сотрудник,  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
E-mail: [rambler7780@rambler.ru](mailto:rambler7780@rambler.ru)

*Аннотация:* Для оценки современного состояния летнего зоопланктона в августе 2014-2015 гг. проводились съемки на Онежском озере. Количественные показатели зоопланктона были несколько ниже среднемноголетних, но в пределах межгодовой изменчивости. В Петрозаводском и Кондопожском заливах, подверженных антропогенному влиянию, наблюдались основные закономерности трансформации сообщества зоопланктеров. В 2014 г. в олиготрофном районе Большое Онего было отмечено увеличение доли ветвистоусых до 55%, что свидетельствует о спорадическом изменении трофической ситуации из-за выноса сточных вод из Кондопожской губы.

*Ключевые слова:* зоопланктон, антропогенное влияние, трансформация сообщества

Онежское озеро - одно из Великих озер Европы, входит в двадцатку крупнейших озер мира. Озеро является огромным ресурсом пресной воды [12]. В настоящее время планктонная система Онежского озера имеет олиготрофный статус, однако северо-западные губы подвержены антропогенному эфтрофированию. Источником загрязнения для Кондопожского и Петрозаводского заливов выступают сточные воды Кондопожского ЦБК и коммунальные стоки [19]. Кроме того, в последние десятилетия отмечено влияние климатических изменений на биоту пресноводных экосистем [21]. Зоопланктон используется в биомониторинге как чувствительный индикатор состояния экосистемы.

Первые сведения о зоопланктоне Онежского озера приведены Карлом Кесслером [2] во второй половине XIX в. В работе «Материалы для познания Онежского озера и Обонежского края, преимущественно в зоологическом отношении» собран материал не только по рыбам, входящим в бассейн Онежского озера, но и данных о животных составляющих основу их питания. Далее был период эпизодических исследований (1919-1924 гг.) под руководством Г. Ю. Верещагина [10]. За последние 90 лет (с 1926 года по настоящее время) опубликованные работы дают представление о большом объеме накопленной информации о видовом составе, экологии, численности и биомассе, доминантном комплексе, его кормовой ценности для рыб-планктофагов, продукционном потенциале сообществ зоопланктона и трансформации его под действием антропогенных факторов [6;11;14;15; 16;20].

### **Материал и методы**

Работа основана на материалах экспедиций, полученных в рамках проекта РНФ №14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние» в августе 2014 – 2015 гг. Пробы зоопланктона отбирали количественной сетью (с диаметром отверстий 50 мкм) фракционно по слоям (5-0, 10-5, 25-10, 50-25, 75-50, 100-75 м) и фиксировали 4%- формалином. Сбор и обработка материала проводили по стандартной методике [9]. Биомассу считали с помощью индивидуальных весов ракообразных и коловраток, учитывая каждую размерно-весовую группу [8].

В исследованный период состав зоопланктона был довольно однороден по озеру, отмечены виды, характерные для всех крупных озер северо-запада России и Северной Европы. Доминирующий комплекс пелагиали представлен 15-20 видами. В 2014 и 2015 гг. массового развития достигают веслоногие рачки: *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Eurytemora lacustris* (Pope, 1887), викарные виды *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863). Особый интерес вызывает реликтовый рачок *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863, который

характерен для глубоких олиготрофных озер. Среди ветвистоусых рачков можно выделить: *Daphnia (D.) cristata* Sars, 1862, *D. (D.) longispina* Müller, 1785, *Bosmina (E.) coregoni* Baird, 1857, *B. (E.) cf. longispina* Leydig, 1860). Среди коловраток существенную роль играют *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Polyarthra major* Burckhardt, 1900, *Conochilus* sp.

За последние 60 лет в составе зоопланктона кардинальных изменений не произошло. Можно отметить, некоторые изменения в структуре. Так, пелагический и массовый для озер Карелии вид *Bosmina (E.) cf. crassicornis* Lilljeborg, 1887 входит в список видов зоопланктона Онежского озера [5; 6] Однако, начиная с 70-х годов прошлого века, вид в пелагиале озера отмечен не был. С 2013 г. *B. (E.) cf. crassicornis* обнаруживалась в заметном количестве на открытой литорали (численность до 1,5 тыс. экз./м<sup>3</sup>) и в прибрежной зоне Петрозаводской губы (до 3-4 тыс. экз./м<sup>3</sup>). Причем в Петрозаводской губе наблюдалась высокая численность данного вида 44 тыс. экз./м<sup>3</sup>, что составляло около 40 % общей численности зоопланктона. В августе 2014 г. этот вид впервые был отмечен в пелагиали центральной части Петрозаводской губы (0,2 тыс. экз./м<sup>3</sup>). В августе 2015 г. в Кондопожской губе данный вид был особенно многочислен в вершинной части, т.е. в районе наиболее подверженном антропогенной нагрузке. Здесь его численность достигала 15 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,365 г/м<sup>3</sup>, что составляло 35 % общей численности и 27 % общей биомассы. Ранее массовая *B. (E.) cf. longispina* составляла, соответственно, 1 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,010 г/м<sup>3</sup>, а *B. (E.) coregoni*, являющаяся постоянным компонентом летнего планктона, вообще не была отмечена. Так в 80-90-х гг. основу ветвистоусых в губах составляли виды *B. (E.) cf. longispina* и *B. (E.) coregoni*, а в 2014 и 2015 годах преобладала *B. (E.) cf. crassicornis*

Температурные и трофические условия озера определяют количественные показатели зоопланктонных сообществ и распределение планктона по акватории озера.

Центральный район Онежского озера и залив Большое Онего это глубоководные пелагические районы, объединенные хорошим водообменом и обладающие сходными термическими условиями. Как правило, количественные показатели зоопланктона из этих районов сходны и структура зоопланктона соответствуют олиготрофному статусу планктонной системы. Количественные характеристики центральной части озера и залива Большое Онего в 2014 и 2015 гг. близки к среднеголетним данным [7;14;15;16]. Доля веслоногих по численности и биомассе более 50 % (табл.2).

По результатам мониторинга 1998-2006 гг. состояние планктонной системы Петрозаводской губы по показателям зоопланктона приближалась к β-мезотрофному уровню (биомасса 1,8 г/м<sup>3</sup>, численность 37,9 тыс.экз./м<sup>3</sup>) [4]. В исследованиях 2014-2015 гг. показатели снижаются (таб.1). По численности преобладали мелкие циклопы и их копепоидитные и науплиальные стадии, по биомассе доминировали ветвистоусые рачки (таб.2), что характерно для данного периода [17].

Таблица 1  
Средние летние показатели зоопланктона по районам озера за 2014-2015 гг.

Район	Численность		Биомасса	
	тыс. экз./м <sup>3</sup>	тыс. экз./м <sup>2</sup>	г/м <sup>3</sup>	г/м <sup>2</sup>
Центральный плес	2,0	125	0,08	3,95
Залив Большое Онего	1,0	97	0,04	3,16
Петрозаводская губа	5,0	102	0,16	3,40
Центральная и открытая часть Кондопожской губы	4,0	240	0,13	6,87
Вершинная часть Кондопожской губы	23,0	249	0,73	8,06



Структура летнего зоопланктона (%) по районам в 2014-2015 гг.

Район	Численность			Биомасса		
	Весло-ногие	Ветви-стоусые	Коло-вратки	Весло-ногие	Ветви-стоусые	Коло-вратки
Центральный плес	57	20	23	62	28	10
Залив Большое Онего	57	18	25	44	38	18
Петрозаводская губа	63	25	12	40	48	12
Центральная и открытая часть Кондопожской губы	38	37	25	41	38	21
Вершинная часть Кондопожской губы	13	82	5	14	83	3

В Кондопожской губе отмечено долговременное влияние сточных вод целлюлозно-бумажного комбината, которое вызывает трансформацию зоопланктонного сообщества [3]. Количественные характеристики в районе, наиболее подверженной антропогенному влиянию, выше, чем в центральном плесе по биомассе в 9 раз и по плотности в 12 раз (таб.1), уровень развития зоопланктеров уменьшается к выходу из залива (рис.1). Структура зоопланктона так же соответствует трофическим условиям. В трансформированном сообществе вершинной части Кондопожской губы, как и в предыдущие годы, высока доля кладоцер (рис.1). Основным компонентом зоопланктона этого района, *Daphnia (D.) cristata* (43-44 % общей численности и 50-51 % общей биомассы), а так же *B.(E.) cf. crassicornis* (32-35% и 25-27 % соответственно).

Биоразнообразие в районе с высокой антропогенной нагрузкой было ниже, чем в других районах. Так индекс Шеннона по численности здесь был 2,42 против 3,32 в заливе Большое Онего. Надо отметить, что индекс Шеннона в пелагиали озера в данный сезон обычно колеблется около 3-3,5, снижаясь в губах до 2,5, а в некоторых экстренных ситуациях и до 2,0 и ниже [6].

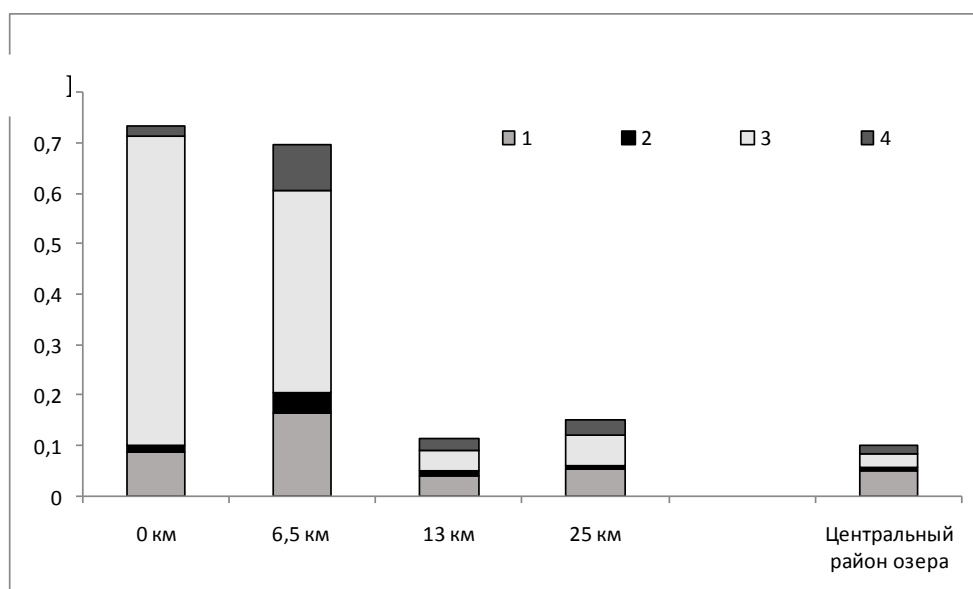


Рис.1. Изменение биомассы зоопланктона ( $B, \text{г/м}^3$ ) в Кондопожской губе в зависимости от расстояния до места сброса сточных вод  
1 – *Calaniformes*, 2 – *Cyclopiformes*, 3 – *Cladocera*, 4 – *Rotifera*.

Особую тревогу вызывают ситуации, при которых трансформированные сточные воды Кондопожской попадают в залив Большое Онего [13]. Увеличение количества биогенных элементов здесь изменяет продукционные свойства планктона [18] и его структуру. Так, в 2014 году при близких значениях биомассы зоопланктона в центральном районе и в заливе Большое Онего, структура сообщества зоопланктона различалась (рис.2). В центральном районе преобладали веслоногие (76%), а в заливе Большое Онего - ветвистоусые (55%). Поскольку доля ветвистоусых рачков в озерном зоопланктоне связана с уровнем трофии [1], можно говорить, об изменении трофической ситуации.

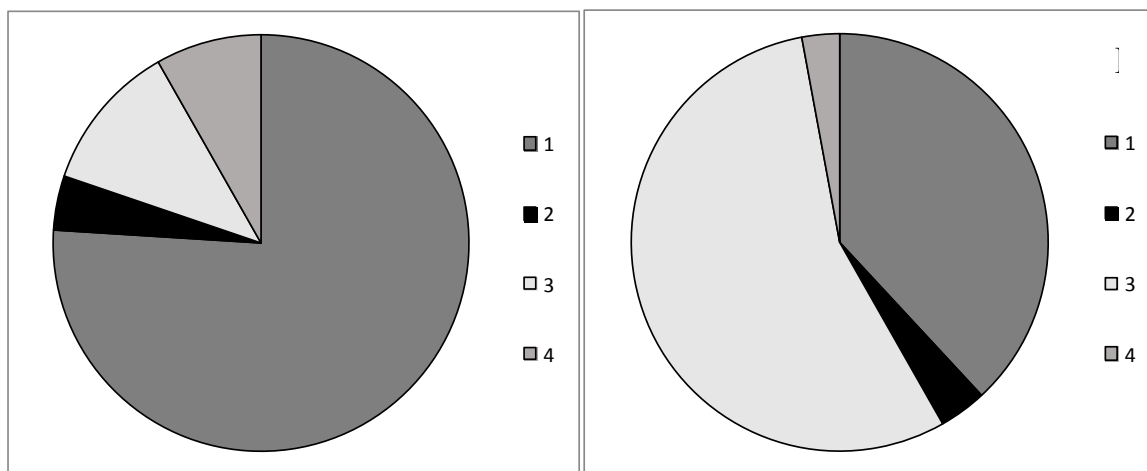


Рис. 2. Биомасса и структура сообщества зоопланктона в центральном районе (А) и заливе Большое Онего (Б) в 2014 г.

1 – *Calaniformes*, 2 – *Cyclopiformes*, 3 – *Cladocera*, 4 – *Rotifera*.

Сравнение состояния зоопланктона в районе с высокой антропогенной нагрузкой и в районе с нагрузкой низкой, близкой к естественной, показало, что основные закономерности трансформации сообщества, отмеченные ранее сохраняются [3]. Так различия касались количественных параметров, структуры, руководящих видов и общего разнообразия сообщества.

За последние 60 лет зоопланктон пелагиали Онежского озера практически не изменился и находится в естественном стабильном состоянии. В Петрозаводской и Кондопожской губы отмечены признаки трансформации, причем степень трансформации зоопланктона отражает интенсивность антропогенной нагрузки. В 2014-2015 гг. количественные показатели по озеру были несколько ниже среднеголетних данных, но находились в пределах межгодовой изменчивости. В последнее время отмечается увеличение роли видов тепловодного комплекса, ранее редких и малочисленных, что может быть связано с потеплением климата.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766)»

#### Литература:

1. Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем / И. Н. Андроникова. – СПб.: Наука, 1996. - С.190.
2. Кесслер К. Ф. Материалы для познания Онежского озера и Обонежского края, преимущественно в зоологическом отношении: Приложение к трудам Первого съезда русских естествоиспытателей / К. Ф. Кесслер. - СПб.: Тип. Императорской Академии Наук, 1868. - С.148.
3. Куликова Т. П. Влияние антропогенного евтрофирования на распределение зоопланктона в Кондопожской губе Онежского озера / Т. П. Куликова, М. Т. Сярки // Водные ресурсы. - 2004. - Т. 31. - № 1. - С. 91-97.
4. Куликова Т. П. Зоопланктон / Т. П. Куликова, М. Т. Сярки // Состояние водных объектов Республики Карелии. По результатам мониторинга 1998-2006гг. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. - С. 54-62.

5. Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Онежского озера / Т. П. Куликова. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. - С. 223.
6. Куликова Т. П. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера / Т. П. Куликова, Н. Б. Кустовлянкина, М. Т. Сярки. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1997. - С. 112.
7. Куликова Т. П. Особенности структуры и функционирования биологических сообществ под влиянием природных и антропогенных факторов. Структура и количественные показатели зоопланктона / Т. П. Куликова, М. Т. Сярки // Онежское озеро. Экологические проблемы. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. - С. 191–211.
8. Куликова Т. П. Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера (справочно-информационный материал) / Т. П. Куликова, М. Т. Сярки. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. - С. 16.
9. Методические материалы по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева - Л.: ГосНИОРХ, 1984. - С.33.
10. Николаев Н. Н. Сравнительно-лимнологическая характеристика зоопланктона Онежского озера / Н. Н. Николаев // Зоопланктон Онежского озера. - Л.: Наука, 1972. - С. 283-304.
11. Поливанная М. Ф. Материалы к познанию зоопланктона Онежского озера: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. биол. наук / Поливанная М. Ф. – Петрозаводск: Карело-Фин. гос. ун-т., 1950. - С. 18. 33.
12. Румянцев В. А. Великие озера мира /В. А. Румянцев, В. Г. Дробкова, А. В. Измаилова. – Спб.: Лема, 2012. – С. 370.
13. Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды озера / А. В. Сабылина, А. В. Рыжаков // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998-2006 гг. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. - С. 29-40.
14. Смирнова Т. С. Планктонные коловратки и ракообразные / Т. С. Смирнова // Зоопланктон Онежского озера. - Л.: Наука, 1972. - С. 126-233.
15. Сярки М. Т. Зоопланктон / М. Т. Сярки // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 121-127.
16. Сярки М. Т. Оценка рыбопродуктивности по состоянию кормовой базы. Зоопланктон // Биологические ресурсы Онежского озера. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. С. 54-67.
17. Сярки М. Т. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озер / М. Т. Сярки, Ю. Ю. Фомина // Труды КарНЦ РАН. Сер. Экологические исследования. - 2015. - №1.- С. 63-68.
18. Сярки М. Т. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере / М.Т. Сярки, Е. В. Теканова // Известия РАН. Серия Биологическая. - 2008. - № 5. - С. 621-625.
19. Тимакова Т. М. Современное состояние экосистемы онежского озера и тенденции её изменения за последние десятилетия / Т. М. Тимакова, А. В. Сабылина, Т. Н. Полякова, М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т. А. Чекрыжева // Труды Карельского научного центра РАН. - 2011. - №4. - С.42-49.
20. Урбан В. В. Кормовые ресурсы планктона Онежского озера / В. В. Урбан // Тр. Кар. ГосНИОРХа. - 1968. - Т. 4, вып. 3. - С. 106-132.
21. Филатов Н. Н. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты / Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, А. В. Семенов, А. Р. Анциферова, В. Н. Ожигина, М. И. Богдан // Арктика: экология и экономика. - 2012. - №2 (6). - С. 80-93.

## CURRENT STATE OF ZOOPLANKTON OF LAKE ONEGO PELAGIC ZONE

Yulia Yuryevna Fomina  
Junior Researcher,  
Northern Water Problems Institute,  
Karelian Research Centre of RAS,  
E-mail: [rambler7780@rambler.ru](mailto:rambler7780@rambler.ru)

*Abstract:* To assess the current state of Lake Onego zooplankton community during summer period, sampling was carried out in August 2014-2015. Quantitative characteristics of the lake zooplankton were slightly below the long-term annual average values. The basic trends of the zooplankton community transformation were observed in Petrozavodsk and Kondopoga bays, which are under the influence of anthropogenic load. The increase of the Cladocera proportion up to 55% in the Bolshoe Onego (oligotrophic area) noted in 2014 year indicates the sporadic change in the trophic state of the area due to sewage discharges from Kondopoga Bay.

*Keywords:* zooplankton, anthropogenic influence, the transformation of community

## МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕРА СЕЛИГЕР В РАЙОНЕ Г. ОСТАШКОВА

Сергей Иванович Шапоренко,  
к.г.н., старший научный сотрудник  
ФГБУ Институт географии РАН  
E-mail: [ser-shaporenko@yandex.ru](mailto:ser-shaporenko@yandex.ru)  
Вячеслав Викторович Кузовлев,  
к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО  
«Тверской государственной технической университет»,  
начальник лаборатории мониторинга загрязнения окружающей среды  
Тверского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центральное УГМС»,  
E-mail: [v\\_Kuzovlev@mail.ru](mailto:v_Kuzovlev@mail.ru)

*Аннотация:* По данным гидрохимического мониторинга (за период 2006-2015 гг.), который осуществляет Тверской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, исследована изменчивость качества воды в оз. Селигере около г. Осташкова (начало Селижаровского плеса). Весенний прогрев воды сопровождается закономерными изменениями, преимущественно природного характера, в содержании  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Si, БПК<sub>5</sub>, Cu, Mn, которые описываются средними и умеренными статистически достоверными корреляционными связями. В последний десятилетний период выявляются тенденции снижения концентраций взвешенных веществ, кремния, марганца, БПК<sub>5</sub> и некоторых других ингредиентов, что сказалось на уменьшении среднегодового индекса загрязнения воды (УКИЗВ) с 3,67 в 2006 г. до 1,28 в 2011 и 1,29 в 2015 г. По этому индексу с 2007 г. озеро Селигер является одним из самых чистых водных объектов Тверской области.

*Ключевые слова:* гидрохимический мониторинг, озеро Селигер, город Осташков, концентрации веществ, корреляционные связи, индекс загрязнения

Научные исследования оз. Селигера имеют длительную историю (наблюдения над колебанием уровня начаты в 1847 г. в г. Осташкове) и носили в основном экспедиционный (эпизодический) характер. Открытие в 1902 г. уровнемерного поста около городской пристани Осташкова в начале нижнего плеса, из которого начинается сток из озера, позволило систематически оценивать водные ресурсы водной системы Селигера, получать сведения в помощь судоходству. В 1966 г. на базе поста создан пункт гидрохимического мониторинга, который с 1977 г. стал работать по программе IV категории. С 1990 по 2005 гг. гидрохимические наблюдения не проводились. Это затрудняло изучение временной изменчивости химического состава вод, колебания характера их антропогенного загрязнения. Хотя главные задачи по охране экосистемы озера в целом, и в первую очередь Осташковского (Городского) плеса, которая периодически признавалась в кризисном состоянии, были в общем виде поняты и описаны [1].

В 2006 г. работа пункта наблюдений оз. Селигер – г. Осташков была возобновлена Тверским ЦГМС, и в озере стал определяться полный комплекс гидрохимических показателей. В данной работе осуществлена попытка предварительного анализа сезонной (зима–лето) и многолетней изменчивости основных гидрохимических параметров, что актуально для решения задач мониторинга и охраны качества вод, которые стоят перед Гидрометслужбой. Поскольку Селижаровский плес принимает основной водный сток из озера, то это позволяет судить о качестве вод если и не всего озера, то, по крайней мере, прилегающей к городу акватории, потенциально наиболее подверженной антропогенному загрязнению.

В работе использованы данные регулярных (до 6–7 раз в год) наблюдений за химическим составом и температурой воды. В зимние месяцы пробы отбираются один раз (в январе или феврале), в остальные календарные сезоны до 2013 г. отбирались по 1-2 раза. С 2014 г. с

переходом на программу наблюдений для водоемов количество ежегодных определений сократилось до четырех. Для оценок тенденций изменчивости использованы только результаты прямых аналитических определений из таблиц ТГ-52, сомнительные или аналитически недостоверные значения показателей исключались. Все расчеты с построением графиков осуществлены в программе Excel.

**Внутригодовая изменчивость.** Средние амплитуды внутригодового колебания величин отдельных гидрохимических параметров показывают осредненные значения для зимних месяцев и для августа (табл. 1). Августу отдано предпочтение по сравнению с июнем, поскольку он оказался гораздо теплее (средние температуры воды 21,5 и 17,4°C соответственно за период 2007-2013 гг., когда измерения проводились в оба месяца) и имеет более продолжительный ряд наблюдений. Как видно из таблицы, некоторые показатели летом значительно выше, чем зимние (помимо температуры это – взвешенные вещества, БПК<sub>5</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и др.), некоторые ниже зимних (O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> и др.), а концентрации ряда ингредиентов почти не изменяются (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, жесткость, Zn и др.).

Для того, чтобы выяснить, в какой мере изменения концентраций гидрохимических параметров связаны с весенне-летним прогревом воды (имеют природные причины), мы сопоставили весь массив измеренных величин в зимние, весенние и летние месяцы с показателями температуры воды на даты отбора проб за весь период наблюдений. Получили ряды из 32-48 пар. Наиболее высокие значения парных коэффициентов линейной корреляции с температурой оказались для нитратов и кремния ( $r = -0,58-0,60$ ) при их статистической значимости в пределах  $p = 0,001$ . Умеренную связь демонстрируют фосфаты ( $r = -0,412$ ,  $p = 0,01$ ), БПК<sub>5</sub> ( $r = 0,362$ ,  $p = 0,05$ ) и Cu ( $r = -0,308$ ,  $p = 0,05$ ). Слабая связь с температурой у Mn ( $r = -0,294$ ,  $p = 0,05$ ). У остальных гидрохимических показателей связь с температурой очень слабая или отсутствует.

Таблица 1

Средние многолетние характеристики качества воды в поверхностном слое оз. Селигер по гидрохимическим показателям около г. Осташков (составлено по данным Тверского ЦГМС за период 2006-2016 гг.)

Параметр, мг/л	Зима (январь-февраль)		Лето (август)		ПДК
	Среднее	Среднее отклонение	Среднее	Среднее отклонение	
T, °C	0,4	0,4	21,1	1,9	
Цветность, град.	52,6	11,1	61,4	10,5	
Взвешенные вещества	5,9	4,4	7,6	3,6	
pH	7,65	0,29	8,18	0,57	
O <sub>2</sub>	12,23	1,04	8,25	0,59	
ХПК	28,1	3,6	29,9	3,7	15,0
БПК <sub>5</sub> мгО/л	0,86	0,27	2,33	0,86	2,0
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,223	0,118	0,026	0,025	9,0
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,060	0,018	0,063	0,045	0,39
P фосфатный	0,015	0,003	0,007	0,005	0,2
Si	1,20	0,48	0,43	0,11	10,0
Fe общ	0,049	0,010	0,053	0,023	0,1
Ca <sup>2+</sup>	18,3	2,3	17,8	1,8	180,0
Mg <sup>2+</sup>	3,60	1,45	3,94	0,93	40,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	47,7	11,1	60,4	12,3	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,7	1,5	2,7	1,7	100,0
Cl <sup>-</sup>	5,8	2,3	6,4	3,1	300,0
Сумма ионов	84,6	12,2	95,0	19,4	1000,0
Жесткость, мг-экв/л	1,21	0,07	1,21	0,11	
Нефтепродукты	0,06	0,05	0,03	0,01	0,05

СПАВ	0,026	0,008	0,035	0,012	0,1
Фенолы	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001
Mn	71,0	38,4	50,0	11,4	10,0
Cu	4	3	2,9	0,5	1,0
Ni	4,1	0,7	3,9	0,5	10,0
Zn	6,3	1,9	6,5	1,3	10,0

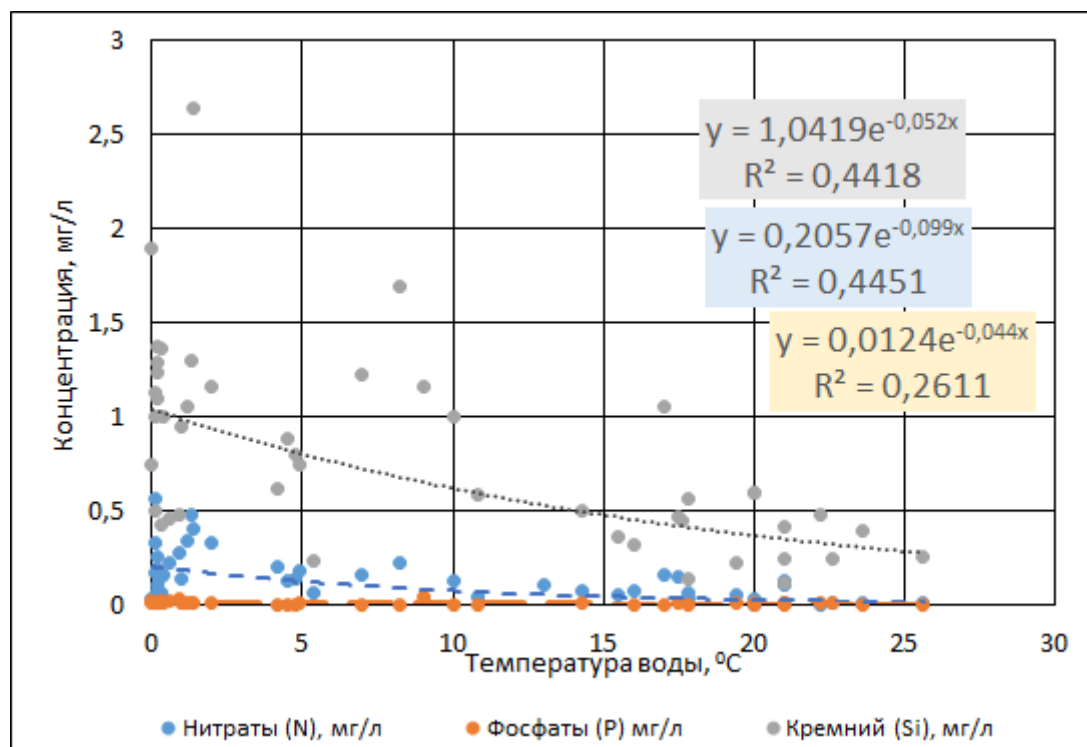


Рис. 1. Связь содержания нитратов, фосфатов и кремнекислоты с температурой воды. На рисунке нанесены аппроксимирующие кривые с уравнениями.  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации.

Анализ табл. 1 и рис. 1 показывает во многом типичное сезонное развитие природных процессов в водоемах. При весеннем прогреве вод озера при ухудшении растворимости уменьшается содержание растворенного кислорода, интенсификация биопродукционных процессов сокращает содержание всех биогенных элементов (особенно заметно при весенней вспышке диатомовых), при этом возрастает концентрация легкоокисляемых органических веществ по БПК<sub>5</sub>. Экспоненциальная форма аппроксимаций указывает на более быструю убыль содержания биогенных веществ в начальную стадию весеннего прогрева. На концентрации марганца, вероятно, сказываются также условия миграции. С одной стороны, они несколько лучше в фазу подъема весеннего половодья еще при низкой температуре, когда повышено содержание сульфатов и гуминовых веществ, с которыми он образует комплексы. При дальнейшем прогреве происходит небольшая убыль сульфатов, увеличивается биологическое потребление марганца. В итоге содержание его растворенной формы в продолжении весны несколько уменьшается. Медь в воду озера больше поступает при питании грунтовыми водами заболоченных территорий в зимнюю межень, когда развивается дефицит кислорода. Роль температурного фактора потенциально может проявляться, вероятно, не только в сезонной динамике концентраций веществ. Температурный режим необходимо учитывать и при выяснении причин многолетних тенденций гидрохимических параметров.

**Межгодовая изменчивость параметров.** Для зимних месяцев последнего десятилетнего периода возможный тренд температуры (при линейной аппроксимации) не превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ , а с учетом температуры воды при зимнем отборе проб в 2016 г., он не более  $0,05^{\circ}\text{C}$ . Для августа линейный тренд изменения температуры воды с 2006 по 2015 гг. дает увеличение с  $19,5$  до  $22,8^{\circ}\text{C}$ . Однако межгодовая изменчивость температуры августа гораздо точнее аппроксимируется полиномом второй степени (величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,49$ ), при этом повышение температуры за период происходит с  $17,5$  до  $20,6^{\circ}\text{C}$  с максимумом в 2011-2012 гг. почти в  $23^{\circ}\text{C}$ . Следует уточнить, что температура воды показывает не столько климатические тенденции, сколько условия отбора проб воды, которые могут повлиять на параметры, имеющие связь с температурным фактором (в первую очередь растворенные кислород, углекислый газ, рН и др.).

Можно говорить о наличии выраженных тенденций изменчивости содержания взвешенных веществ, кремния и марганца в зимнее время (рис. 2А). Они аппроксимируются полиномами второй степени ( $R^2$  соответственно равны  $0,67$ ,  $0,54$  и  $0,53$ ). Такой ход многолетней изменчивости указывает на снижение концентраций до минимальных значений в 2011-2013 гг. с небольшим ростом к 2015-2016 гг.

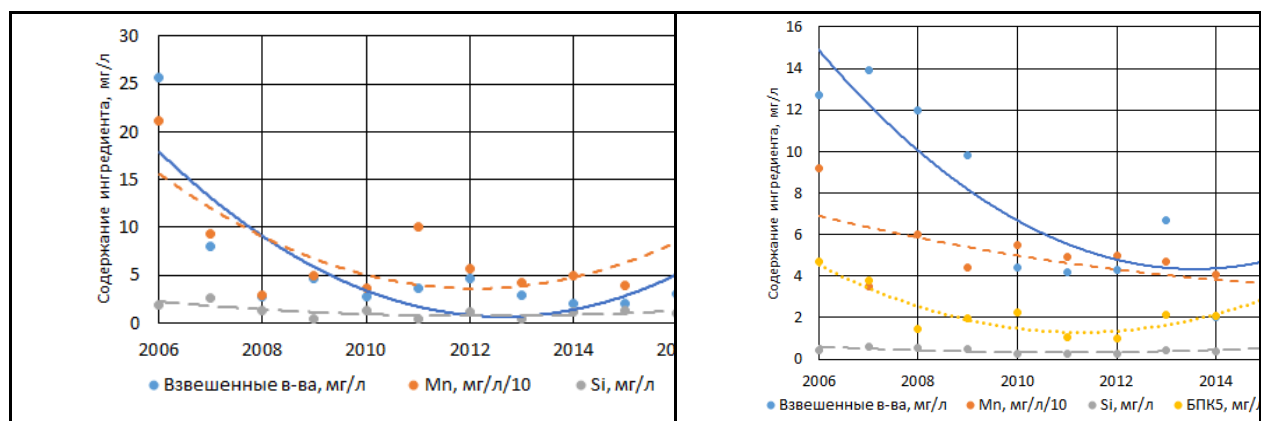


Рис. 2. Изменение содержания гидрохимических ингредиентов: А - в зимнее время и Б – в августе: взвешенных веществ, марганца, кремния и БПК<sub>5</sub>.

Указанные ингредиенты и в летнее время проявляют отмеченные закономерности в многолетней изменчивости, хотя для марганца аппроксимация несколько лучше выражается логарифмической функцией ( $R^2 = 0,79$ ,  $0,45$  и  $0,48$ ). Полиномом второй степени аппроксимируется также ход БПК<sub>5</sub>, для которого  $R^2 = 0,80$  (рис. 2Б). Аналогичный многолетний ход показывают концентрации азота аммонийного и нефтепродуктов ( $R^2 = 0,57$  и  $0,70$  соответственно). Для всех этих ингредиентов после заметного снижения концентраций к 2011-2013 гг., в последние два года наблюдается небольшое их увеличение.

Из ингредиентов, которые проявляют более или менее выраженные тенденции многолетней изменчивости, в разной степени тесные и статистически достоверные связи с температурой отмечены для Si, БПК<sub>5</sub>, Mn. Для взвешенных веществ,  $\text{NH}_4^+$  и нефтепродуктов корреляции с температурой не выявляются. У всех ингредиентов синхронный ход (положительные полиномы второй степени) симметричен многолетнему ходу летней температуры (отрицательные полиномы второй степени). Экстремумы значений у всех характеристик приходятся на 2011-2013 гг. Указанное соответствие может означать во многом природную обусловленность многолетней динамики перечисленных ингредиентов. На это указывает также их синхронность с динамикой



кремния, содержание которого в природных водах почти не подвержено антропогенному воздействию.

**Многолетняя динамика качества.** Качество воды по гидрохимическим показателям в водных объектах в последнее десятилетие организациями Гидрометслужбы повсеместно стало оцениваться комплексным критерием УКИЗВ, пришедшем на смену более простому ИЗВ. Изменение индекса по пункту наблюдения в г. Осташков приведено на рис. 3.

В 2006 г. по качеству вода в оз. Селигер характеризовалась как очень загрязненная (3 класс), в 2007-2009 гг. как загрязненная, а, начиная с 2010 г., как слабо загрязненная (2 класс). По сведениям ежегодников качества поверхностных вод на территории деятельности Тверского ЦГМС за 2008-2015 гг. во все последние годы превышения ПДК наблюдались обычно по меди, марганцу, органическим веществам (по ХПК и БПК<sub>5</sub>), редко фенолам. Загрязнение нефтепродуктами рассматривается как потенциальная угроза, исходящая со стороны судоходства. Случаи высокого и экстремально высокого загрязнения какими-либо веществами с 2006 г. (года возобновления мониторинга) не наблюдались.

Как показывали регулярные обследования многочисленных водных объектов водосбора Верхней Волги, повышенные концентрации всех перечисленных веществ вместе с аммонийным азотом, нитритами и некоторыми микроэлементами образуют региональный природный фон [2]. Однако это не исключает и определенного негативного антропогенного воздействия.

Во временной изменчивости индекса УКИЗВ обращает на себя внимание определенная синхронность его хода с упоминавшимися выше параметрами (Si, БПК<sub>5</sub> и др.), которые описываются полиномами второй степени с минимальными значениями в 2011-2013 гг., а также слабой тенденцией роста концентраций в 2014-2015 гг. Динамика улучшения качества воды в озере, наблюдавшаяся в 2006-2010 гг., сменилась периодом определенной стабилизации на удовлетворительном уровне. Начиная с 2007 г. качество воды по гидрохимическим показателям в озере Селигер в районе г. Осташкова – одно из лучших в пунктах наблюдений Тверского ЦГМС.

Работа выполнена по бюджетной теме № 01201352493.

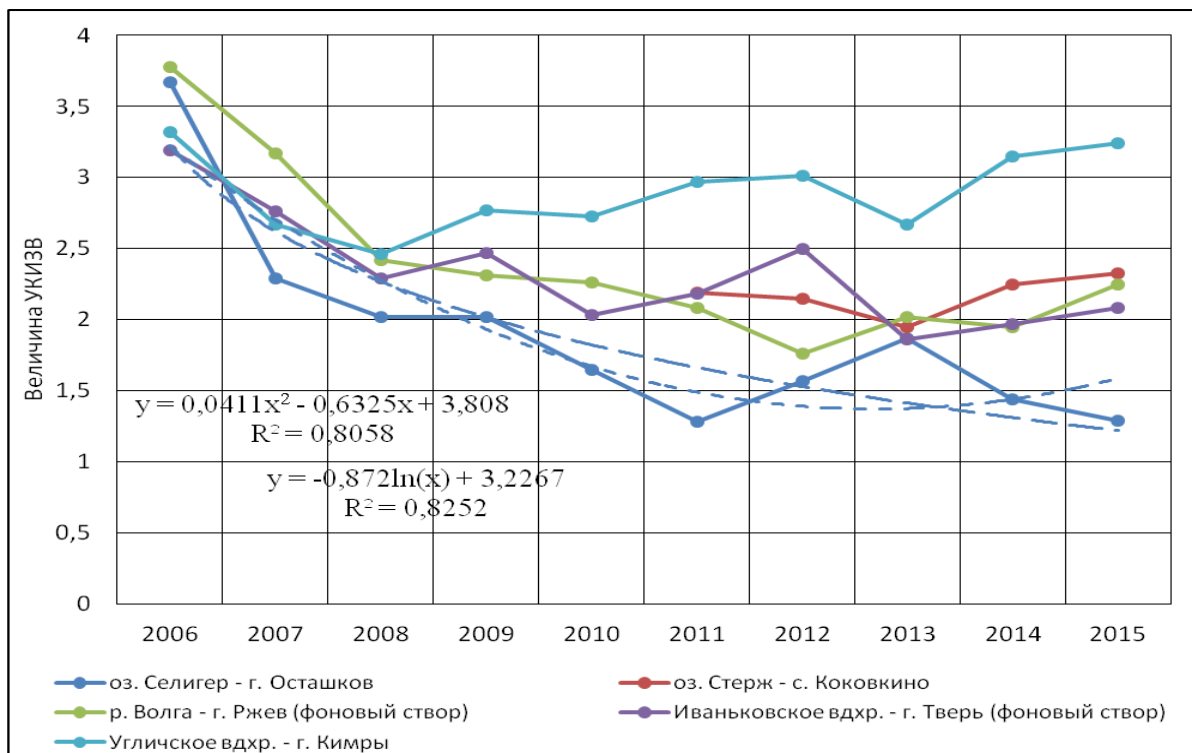


Рис. 3. Изменение средней годовой величины УКИЗВ в пунктах контроля Тверского ЦГМС водосбора Верхней Волги. Уравнения и линии аппроксимаций изменчивости УКИЗВ по г. Осташков: короткий штрих – полином второй степени; длинный штрих – логарифмическая функция.

Литература:

1. Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях / Отв. ред.: В. П. Беляков, С. И. Шапоренко. СПб.: Наука, 2004. 254 с.
2. Шапоренко С. И., Кузовлев В. В., Терентьев И. И. Гидрологическое и гидрохимическое обследование верхнего участка р. Волги и ее притоков // Труды Пресноводного Исследования. Der Andere Verlag, 2006. Т. 1. С. 15-75.

**LONG-TERM TRENDS IN WATER QUALITY CHANGES OF THE LAKE SELIGER NEAR THE TOWN OF OSTASHKOV**

Sergey Ivanovich Shaporenko  
Ph. D, senior researcher  
Institute of Geography RAS  
E-mail: [ser-shaporenko@yandex.ru](mailto:ser-shaporenko@yandex.ru)

Vyacheslav Victorovich Kuzovlev,  
Ph. D, assistant professor  
of the Tver State Technical University,  
the Head of the Laboratory of Environmental Monitoring  
of the Tver Centre of ROSHYDROMET  
E-mail: [v\\_Kuzovlev@mail.ru](mailto:v_Kuzovlev@mail.ru)

*Abstract:* According to hydrochemical monitoring (for the period 2006-2015), which the Tver Centre for Hydrometeorology and Monitoring of Environment realizes, we investigated the variability of water quality in the lake Seliger near the town of Ostashkov (beginning Selizharov stretch). Spring warming of water accompanied by the order changes, mostly of natural origin, in the content of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Si,  $\text{BOD}_5$ , Cu, Mn, which described by the medium and moderate statistically significant correlations. In the last decade it is revealed a downward trends of suspended solids concentrations, silicon, manganese,  $\text{BOD}_5$  and some other ingredients, that impact on reducing of average annual index of water pollution (UKIZV) from 3.67 in 2006 to 1.28 in 2011 and 1.29 in 2015. This monitoring point since 2007 is one of the cleanest on the index in the Tver region.

*Keywords:* hydrochemical monitoring, Seliger lake, town Ostashkov, the concentration of substances, correlations, pollution index

## ДЕТЕРМИНИРОВАНО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОЕМА РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ

Марина Валентиновна Шмакова  
к.т.н., научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

e-mail: [m-shmakova@yandex.ru](mailto:m-shmakova@yandex.ru)

Елена Геннадьевна Маркова,  
научный сотрудник  
ИНОЗ РАН

e-mail: [adelmonamour@mail.ru](mailto:adelmonamour@mail.ru)

Сергей Алексеевич Кондратьев,  
д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе  
ИНОЗ РАН

e-mail: [kondratyev@limno.org.ru](mailto:kondratyev@limno.org.ru)

*Аннотация:* Разработана детерминировано-стохастическая модель заиления водоема речными наносами. Компонентами модели являются модель формирования стока на водосборе, стохастическая модель погоды, метод расчета годового твердого стока рек и гидродинамическая модель течений и переноса примесей в водоеме. С использованием модели выполнена оценка заиления речными наносами водохранилища Сестрорецкий Разлив.

*Ключевые слова:* заиление, речные наносы, водохранилище, математическая модель

### **Основные положения.**

При решении ряда водохозяйственных задач, связанных с заилением водоемов, возникает необходимость оценки годового твердого стока основных притоков. Существующие рекомендации по расчету твердого стока [5] основаны на использовании данных о мутности расчетной реки или реки-аналога. Однако при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе приведенные методики оценки нормы твердого стока не подходят. Кроме того, часто недостаточность и некорректность данных наблюдений за расходом наносов в реках не дают возможность получить достоверную информацию о параметрах его распределения.

В настоящей работе представлены результаты разработки детерминировано-стохастической модели (ДСМ), рассчитывающей годовой твердый сток притоков водохранилища, интенсивность заиления водохранилища речными наносами с учетом пространственной неоднородности слоя отложения наносов по акватории. Композиционный метод теории вероятности, используемый в ДС моделировании, позволяет на основании достаточно продолжительных данных метеорологических наблюдений рассчитать искомые значения стока воды и наносов с водосбора и интенсивность заиления водоема. Компонентами модели являются модель формирования стока на водосборе, стохастическая модель погоды (СМП), метод расчета годового твердого стока рек и гидродинамическая модель течений и переноса примесей в водоеме. Схема модели, позволяющей выполнять расчеты заиления, как в современных условиях, так и с учетом возможных климатических изменений, приведена на рис. 1.

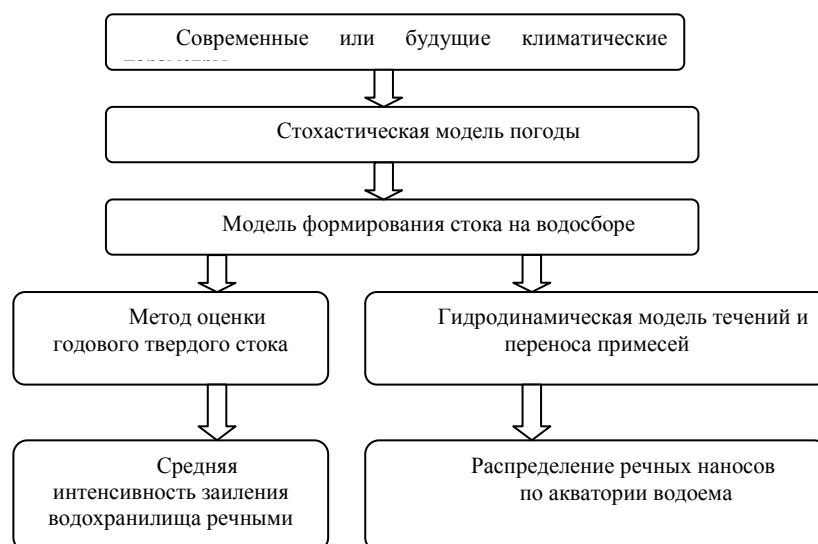


Рис. 1. Схема ДС модели заиления акватории водоема речными наносами.

С использованием ДС модели выполнена оценка заиления речными наносами водохранилища Сестрорецкий Разлив с учетом пространственной и временной изменчивости происходящих процессов. Водохранилище создано на р.Сестре вблизи ее устья в 1723 г. для нужд Сестрорецкого оружейного завода. Площадь зеркала водоема составляет  $10.03 \text{ км}^2$ , средняя глубина – около 2 м, площадь водосбора -  $566 \text{ км}^2$ . Основными притоками Сестрорецкого Разлива являются реки Сестра ( $399 \text{ км}^2$ ) и Черная ( $F_{\text{водсб}} = 126 \text{ км}^2$ ), сток из водохранилища осуществляется через водосливной канал (рис. 2).

#### Сток воды.

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора *ILHM* - Institute of Limnology Hydrological Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015) разработана в Институте озероведения РАН [3, 4] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме.

Моделирование стока реки Сестры, являющейся основным притоком Сестрорецкого Разлива, с использованием модели ИЛНМ проводилось за период с 2000 по 2014 г. Оценка адекватности модели осуществлялась путем сравнения результатов расчета со значениями расходов воды, восстановленных для указанного периода сотрудниками ГГИ. Ввиду отсутствия метеорологических станций на водосборе реки Сестры, среднемесячная температура воздуха и месячные суммы осадков осреднялись по двум близлежащим метеорологическим станциям, расположенным в Выборге и Санкт-Петербурге. Сравнение измеренных (восстановленных) и рассчитанных значений среднемесячных расходов воды и годовых слоев стока позволяет сделать вывод об их удовлетворительном соответствии. Значение критерия Нэша-Сатклиффа составило 74%. Основные причины отклонений между рассчитанными и наблюдаемыми среднемесячными расходами реки Сестры объясняются достаточной удаленностью метеорологических станций от рассматриваемого водосбора и, как следствие, несоответствием между реальной и принятой метеорологической обстановкой на водосборе в расчетный период.

Наблюдения на реке Черной, являющейся вторым крупным притоком Разлива, были прекращены в середине 60-х годов прошлого века. Однако, учитывая непосредственную географическую близость водотоков, их площадей водосборов и то, что условия формирования стока рек Сестры и Черной одинаковы, можно ожидать тесной связи расходов воды исследуемых водотоков. Значения коэффициентов корреляции между среднемесячными значениями расходов воды достаточно высокие – от 0.732 (декабрь) до 0.983 (май). На основании параметров уравнений регрессии для среднемесячных расходов воды, были восстановлены значения среднегодовых и среднемесячных расходов воды р.Черной.

Основой для ДС моделирования характеристик стока служит СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015), обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей формирования стока [7]. Обычно в рамках ДС моделирования стока решаются следующие задачи:

1. Оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели.
5. Оценка параметров распределения годовых значений стока – среднего и среднего квадратичного отклонения.

Итогом ДС моделирования в данном случае является набор кривых распределения годовых значений стока в современных условиях. С использованием СМП для изучаемого объекта сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов – температуры воздуха и слоев осадков – продолжительностью 100 лет. Затем по модели ПЛМ были рассчитаны характеристики стока на основе реальной метеорологии и сгенерированных метеорологических рядов. В табл. 1 приведены параметры распределения среднегодовых расходов воды Сестры (среднегодовое значение  $Q_{cp}$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma$ ), полученные по реальным и сгенерированным метеорологическим рядам и иллюстрирующие удовлетворительное качество работы модели.

Таблица 1

Параметры распределения среднегодовых расходов воды р. Сестры – ст. Белоостров

Ряды расходов воды	$Q_{cp}$ , м <sup>3</sup> /с	$\sigma$
Наблюденные, 2000-2014	4.73	0.61
Рассчитанные по СМП	4.95	0.64

Для оценки возможных изменений стока в будущем использовался детерминированный сценарий климатических изменений, разработанный для восточной части Балтийского региона [2]. В параметры СМП внесены соответствующие изменения и сгенерированы ряды прогнозных значений среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет для условий 2100 года. Сгенерированные прогнозные ряды метеорологических элементов явились входом в модель формирования стока. Результатом расчетов явились прогнозные среднемесячные значения расходов воды (или слоев стока). Рассчитанные средние значения годового стока составили 374 мм/год (4.95 м<sup>3</sup>/с) за период 2000-2014 гг. и 428 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию существенное увеличение слоя осадков приведет к возрастанию стока с водосбора Сестрорецкого Разлива на 14% по отношению к современному периоду.

#### Расчет заиления речными наносами.

Для оценки параметров распределения расходов наносов использован метод оценки годового твердого стока (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014), основанный на использовании аналитической формула расхода наносов [8]. Формула не имеет эмпирических параметров и апробирована на достаточно большом количестве водотоков, лежащих в различных физико-географических зонах и имеющих разные гидравлические и морфологические характеристики. Подробно процедура моделирования расхода наносов представлена в [8].

Для рек Сестры и Черной сгенерированы ряды суточных расходов воды длиной 36500 значений (100 лет) и для каждого расхода воды рассчитаны средняя глубина потока и расход наносов. Среднее относительное отклонение между среднемноголетними рассчитанными и измеренными значениями расходов наносов составило 6% для Сестры и 16% для Черной. В сумме

для водотоков наблюдаемое значение среднего годового твердого стока в современных условиях равно 3500 т/год [1], рассчитанное – 3180 т/год. Основными возможными причинами отклонения являются погрешность аппроксимации зависимости «уровень - расход» и ошибки измерения расхода наносов, с которым сравнивается рассчитанный расход наносов. Согласно проведенным расчетам в настоящее время слой заиления Сестрорецкого Разлива речными наносами составляет 0.09 мм/год. Оценка по данным натурных наблюдений - 0.1 мм/год, что подтверждает приемлемость результатов расчета.

Пространственно-временные закономерности заиления оценивались с использованием гидродинамической модели, основанной на уравнениях «мелкой воды» [6] в двумерной постановке и аналитической формуле расхода наносов. При изменении гидравлики потока меняется и его транспортирующий потенциал в отдельных ячейках расчетной сетки. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с расчетной площади.

Для выполнения гидродинамического моделирования на акватории Разлива было назначено 4245 расчетных точек. Шаг расчетов по времени составил 2 секунды, по пространству – 50 м. На рис. 2 приведены плановая схема течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета в современных условиях. Значения скорости течения воды на акватории крайне незначительно и не превышают нескольких мм/с. Максимальные значения скорости (до нескольких см/с) приходится на места впадения притоков и исток водосливного канала, а также участок транзитного движения водных масс между р. Сестрой и водосливным каналом.



*Рис. 2. Плановая схема течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета (расход воды в р. Сестре  $2 \text{ м}^3/\text{с}$ ).*

На рис. 3 представлено распределение расхода наносов на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период и период половодья в современных условиях. Распределение расхода наносов повторяет распределение скоростей течения на акватории. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной скорости воды (впадения рек Сестры и Черной и место руслового сужения – водосливной канал), участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до мест русловых сужений и участок мелководья в западной части Разлива. Значения расходов наносов незначительны и не превышают нескольких грамм в секунду, что объясняется крайне малыми скоростями течения.

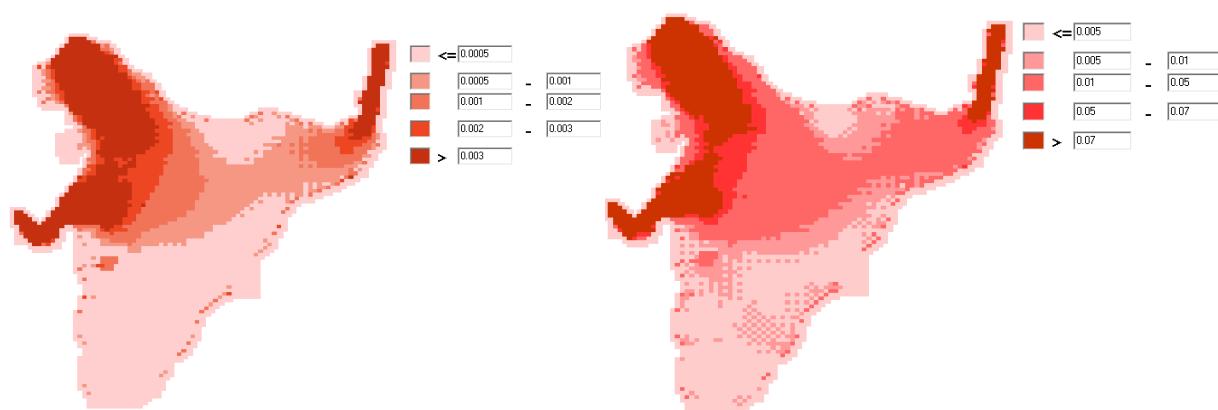


Рис. 3. Схема распределения расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период (слева) и период половодья (справа).

На рис. 4 представлены схемы размыва дна Сестрорецкого Разлива для периода межени при расходе р. Сестры  $2 \text{ м}^3/\text{с}$  и периода спада половодья из расчета среднего по водности года (максимальный расход за половодье составил  $25 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Продолжительность периодов расчета - 10 суток. Наибольшая интенсивность донных переотложений приходится, как и на рис. 3, на места русловых сужений и участки транзитного переноса наносов. При этом десятидневный меженный период характеризуется незначительными скоростями размыва, изменение отметок дна составляет несколько мм/декаду.

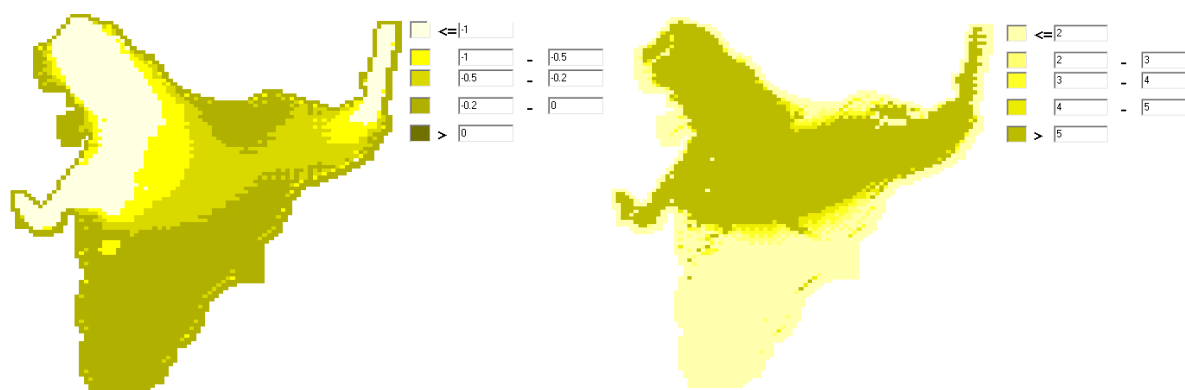


Рис. 4. Схема переформирования дна Сестрорецкого Разлива (мм) для периода межени – размыв (слева) и периода спада половодья – намыв (справа).

Как видно из рис. 4, переформирование дна поступающими из притоков речными наносами незначительно по интенсивности и охватывает главным образом северную часть водоема. Это вызвано малыми значениями скорости воды и, как следствие, слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, из-за небольшой глубины водоема на перераспределение поступающих на акваторию речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание. На рис. 5 приведены плановые схемы течений и расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра в течение суток в меженный период. Выбрано доминирующее в летнюю межень направление ветра — западное [9]. Скорость ветра для расчета принята равной  $5.0 \text{ м/с}$ . Как видно из рис. 5, основные пути транспорта наносов приходятся на северную (участок притоков), западную мелководную и центральную части акватории.

Согласно рассчитанным прогнозным значениям годовых слоев стока для условий 2100 года скорректированы значения суточных расходов воды в притоках. По методу расчета годового твердого стока, изложенного выше, проведена оценка среднегодового значения твердого стока рек Сестры и Черной и вычислены скорости заиления водоема речными наносами. Прогнозные значения годового твердого стока р. Сестры составили  $2811 \text{ т/год}$ , р. Черной —  $1261 \text{ т/год}$ , что почти на 15% превышает современный годовой твердый сток притоков. Возможное увеличение

водности рек Сестры и Черной приведет к более активной циркуляции водных масс в водоеме и, как следствие, расширению области размыва дна или аккумуляции наносов.

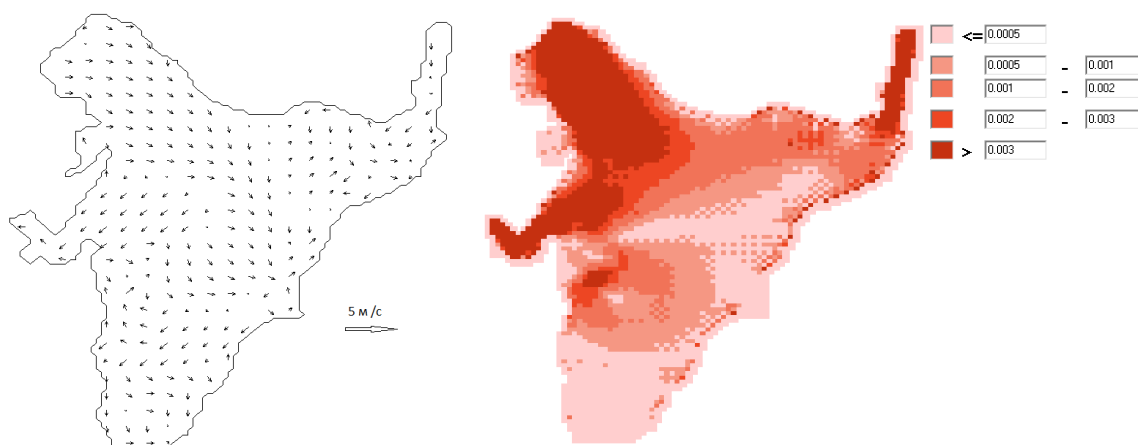


Рис. 5. Схема течений на акватории Сестрорецкого Разлива и распределение расхода наносов (кг/с) при западном ветре 5 м/с.

### Заключение.

Следует отметить, что разработанная ДС модель может эффективно использоваться при решении задач оценки и прогнозирования заиления водоемов речными наносами с учетом пространственной и временной изменчивости происходящих процессов. Подтверждением сказанного являются результаты настоящего исследования.

Для выбранного объекта показано, что особенности морфометрии Сестрорецкого Разлива, а также расположение источников и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. Это отражается как на значениях расходов наносов, так и интенсивности переформирования дна. Распределение речных наносов по акватории, являющееся функцией скорости течения, наиболее выражено в северной части водоема. Согласно гидродинамическим расчетам, наносы рек Сестры и Черной частично откладываются на спаде половодья в устьевых участках, частично переносится течением через акваторию к водосливному каналу. Одним из основных факторов, влияющим на перераспределение донных отложений (как органических, так и грунтовых), является ветровое перемешивание, наиболее интенсивное в период летней межени при западном ветре в средней части Разлива.

### Литература:

1. Водные объекты Санкт-Петербурга. Под ред. С. А. Кондратьева, Г. Т. Фрумина. – СПб.: Символ, 2002.- 348 с.
2. Голицын Г. С., Ефимова Л. К., Мохов И. И., Семёнов В. В., Хон В. Ч. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX – XXI. – Известия РГО, 2002, т. 134, вып.6, с. 34 – 45.
3. Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. - С. 255.
4. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера): Тр. XII съезда РГО. - СПб.: Наука, 2005. - т.6. - С. 99–104.
5. Указания по расчету стока наносов. ВСН 01-73. Л.: Гидрометеиздат, 1974.–30 с.
6. Филатов Н. Н. Динамика озер. Ленинград: Гидрометиздат, 1983. – 166с.



7. Шмакова М. В. Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно – стохастического моделирования характеристик стока: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н.: Спец. 11.00.07 / Гос. гидрол. ин-т. – СПб: 2000. – 25 с.: ил.

8. Шмакова М. В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб: Издательство Лема, 2013. – 142 с.

9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып. 3. Л.: Гидрометеоздат, 1988 г.

## **DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELING OF RESERVOIRS SILTATION BY RIVER SEDIMENT**

Shmakova Marina V.

PhD, Sc. Researcher

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [m-shmakova@yandex.ru](mailto:m-shmakova@yandex.ru)

Markova Elena G.

Sc. Researcher

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [adelmonamour@mail.ru](mailto:adelmonamour@mail.ru)

Kondratyev Sergey A.

DSc, Deputy Director

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

e-mail: [kondratyev@limno.org.ru](mailto:kondratyev@limno.org.ru)

*Abstract:* The deterministic and stochastic model of water body siltation by river sediment is developed. The components of the model are the hydrological runoff model, the stochastic weather model, the method of annual sediment wash-off calculation, and the hydrodynamic model of fluxes and sediment transport in water body. Using the model, the estimation of silting by river sediment in reservoir Sestroretsky Razliv was carried out.

*Keywords:* silting, river sediments, reservoir, mathematical model

**МЕТОД МИКРОИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Екатерина Павловна Щапова,  
лаборант-исследователь НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: shcharova.katerina@gmail.com

Антон Николаевич Гурков,  
м.н.с, НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: a.n.gurkov@gmail.com

Ирина Анатольевна Белоусова,  
к.б.н. НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,  
Институт систематики и экологии животных СО РАН  
E-mail: puza.ia@mail.ru

Екатерина Витальевна Борвинская,  
к.б.н НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,  
Институт биологии Карельского научного центра  
E-mail: katsu@inbox.ru

Борис Кузьмич Бадуев,  
к.б.н, НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: baduevbk@mail.ru

Игорь Владиславович Меглинский,  
к.ф.-м.н., профессор, НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,  
Университет Оулу  
E-mail: Igor.Meglinski@oulu.fi

Максим Анатольевич Тимофеев,  
д.б.н, директор НИИ Биологии  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»  
E-mail: m.a.timofeyev@gmail.com

*Аннотация:* В работе впервые показана возможность прижизненного мониторинга физиологических параметров организма представителей макрозообентоса с помощью инкапсулированных флуоресцентных сенсоров. В качестве объекта исследования был выбран массовый эндемичный вид амфипод *Eulimnogammarus verrucosus*, широко распространённый в литорали озера Байкал. В гемолимфу амфипод были инъектированы рН-чувствительные инкапсулированные сенсоры для измерения рН гемолимфы в одних и тех же животных в условиях акклимации и после гиперкапнического воздействия. После экспонирования в гиперкапнических условиях продемонстрировано закисление рН гемолимфы амфипод, в то время как рН гемолимфы контрольной группы оказался стабилен. Этот результат открывает новые возможности для применения методов прижизненной диагностики в экологическом мониторинге.

*Ключевые слова:* амфиподы, Байкал, микроинкапсулированные флуоресцентные сенсоры, прижизненная диагностика, стресс, экологический мониторинг

Локальные пресноводные водоемы, благодаря своей значимости, в первую очередь попадают в сферу промышленного освоения. На сегодняшний день антропогенное загрязнение окружающей среды и глобальное изменение климата могут привести к резкому ухудшению экологической ситуации во многих водоёмах, существенному снижению качества питьевой воды и темпов производства в различных отраслях народного хозяйства [3].

Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость разработки новых эффективных методов оценки физиологического состояния гидробионтов, с целью интенсификации и ускорения работ при проведении экологического мониторинга и биотестирования. Небольшие размеры организмов [1], наиболее удобные для использования в биотестировании, не позволяют проводить прижизненный отбор внутренних сред организма для анализа его физиологического состояния. Это приводит к использованию в проводимых экспериментальных работах большего количества особей и повышает погрешность измерений из-за влияния внутривидовой вариабельности.

В настоящее время всё большую популярность набирают методы прижизненного исследования физиологических параметров живого организма, предполагающие введение в организм микроскопических оптических сенсоров [7]. Преимущество таких методов заключается в возможности с высокой скоростью и в реальном времени исследовать изменения в организме. Одним из наиболее перспективных типов сенсоров являются инкапсулированные флуоресцентные красители, спектры которых чувствительны к различным химическим и физическим характеристикам растворов. Существует большое разнообразие флуоресцентных красителей, чувствительных к таким показателям как рН, содержание метаболитов и ионов [9]. Инкапсуляция данных красителей в полупроницаемые оболочки позволяет применять их внутри живого организма и легко визуализировать с помощью флуоресцентного микроскопа. Благодаря полупроницаемости оболочки краситель не может выйти за её пределы и оказать токсический эффект на организм, но в то же время остаётся чувствительным к изменению его физиологических параметров.

Озеро Байкал является одним из уникальных природных объектов, флора и фауна которого отличаются высокой степенью эндемизма и биоразнообразия. Озеро является с одной стороны крупнейшим резервуаром питьевой воды на планете, который содержит 20 % всех имеющихся мировых запасов пресной воды, а с другой — чувствительной экосистемой, чьи эндемичные обитатели приспособлены к относительно узкому спектру условий среды [11,16]. В последние годы мониторинг состояния экосистемы озера Байкал особенно актуален в свете развития непрямо́й эвтрофикации его прибрежной зоны [11, 14] наблюдаемой в акватории озера Байкал в последние годы. В частности, в прибрежных районах наблюдается массовое распространение водорослей и макрофитов, вызывающее гибель эндемичных бентосных животных.

Как глобальные климатические изменения, так и эвтрофикация связаны с изменением газового режима водоёмов. В частности, глобальное изменение климата в значительной степени связано с повышением содержания растворённого углекислого газа. Гиперкапния, наблюдаемая при повышении концентрации углекислого газа в среде до определённого уровня, сопряжена с закислением внутренних сред и может вызывать значительные негативные изменения в метаболизме гидробионтов. По этой причине, изменения рН внутренних сред гидробионтов могут быть использованы в качестве маркера стресса в гиперкапнических условиях.

Байкальские амфиподы являются важным компонентом экосистемы озера и населяют преимущественно бентосную зону озера. По таксономическому разнообразию (более 350 видов и подвидов, 41 род и 6 семейств) фауна амфипод в Байкале не имеет аналогов среди континентальных водоёмов мира [10]. Это 4,3 % всей мировой фауны амфипод, более 45 % пресноводных видов и подвидов и 10 % видового разнообразия всей байкальской фауны [15]. Амфиподы населяют все глубины озера, от линии уреза воды до глубоководного ложа, и все типы субстратов, а разнообразие образа жизни отражено в большом богатстве их жизненных форм. По этим причинам байкальские амфиподы могут быть использованы в качестве модельной группы для разработки новых эффективных методов экологического мониторинга озера Байкал. Учитывая значимость амфипод для разнообразных водоёмов в качестве индикаторных видов [13],

разработанные на байкальских амфиподах методы мониторинга могут быть применены в будущем и к другим озёрам и пресноводным водоёмам.

В данной работе на примере байкальских эндемичных амфипод продемонстрирована возможность прижизненного измерения и мониторинга изменений рН внутренних сред животных, имеющих небольшие размеры, с помощью инкапсулированных флуоресцентных сенсоров. Для этого инкапсулированный сенсор, чувствительный к рН, был инъецирован в гемолимфу амфипод и использован для измерений рН гемолимфы одних и тех же особей до и после гиперкапнического воздействия.

В качестве объектов исследования был выбран байкальский эндемичный вид амфипод *Eulimnogammarus verrucosus* (Gerstf., 1858), типичный обитатель нижнего отдела литорали. Это один из наиболее широко распространённых видов амфипод в озере Байкал. Амфиподы были отловлены на берегу Байкала на глубине около 0,5 м возле п. Листвянка (51°52'05.5"N 104°49'47.1"E) в апреле 2016 г (температура воды при отлове составила 1,8 °С). Животные были доставлены в лабораторию и акклимированы к 6 °С в аквариумах объемом 2,5 л в байкальской воде с интенсивной аэрацией. Температура акклимации соответствует среднегодовой температуре прибрежной зоны озера Байкал. Смену воды производили каждые два дня, после чего кормили высушенной и измельчённой смесью водорослей и макробеспозвоночных из места отлова.

Инкапсуляцию рН-чувствительного сенсора SNARF-1, конъюгированного с декстраном (Thermo Fisher Scientific, D3304), проводили с помощью метода послойного нанесения противоположно заряженных полимеров. Благодаря полупроницаемости полученной полимерной оболочки краситель не может выйти за её пределы и оказать влияние на организм, но остаётся чувствительным к изменению его физиологических параметров. SNARF-1 предварительно копреципитировали в микроядра карбоната кальция. Микрокапсулы получали послойной адсорбцией отрицательно заряженного полистиролсульфоната натрия (PSS) и поли (аллиламин гидрохлорида) натрия (ПАН) на поверхности пористых микроядер карбоната кальция, в которые предварительно был копреципитирован SNARF-1. Повышения биосовместимости микрокапсул добивались благодаря наслоению сополимера поли-L-лизина и полиэтиленгликоля (PLL-g-PEG) [5, 8]. На последнем этапе микроядра карбоната кальция растворяли с помощью ЭДТА [12].

В ходе работы был подобран оптимальный объём инъекций, составивший 5 мкл взвеси микрокапсул. Инкапсулированные рН-сенсоры инъецировали в вентральную часть переона амфипод с помощью инсулинового шприца. Для визуализации микрокапсул внутри животных, амфипод помещали в ячейку с байкальской водой с постоянной температурой воды 5-7 °С. Спектральные измерения рН гемолимфы проводили до и после гиперкапнического воздействия при 55-70 мг CO<sub>2</sub>/л воды в течение двух часов. Контрольную группу в течение двух часов эксперимента содержали в условиях акклимации.

Получение сигнала от микроинкапсулированных сенсоров, введённых в амфипод, проводили, используя микроскоп Микмед-2 (ЛОМО, Россия) с подключённым спектрометром QE Pro (Ocean Optics, США). Перед инъекциями проводили калибровку инкапсулированных рН-сенсоров. Микрокапсулы помещали в буферные растворы с рН от 6.0 до 8.6. Микрокапсулы, содержащие SNARF-1, в буферных растворах визуализировали с помощью объектива 40х, спектральный сигнал регистрировали сразу после фиксации объекта под освещением, чтобы минимизировать фоторазложение флуоресцентного сенсора. Протонированная и депротонированная форма SNARF-1 обладают разными спектрами флуоресценции, пики которых находятся в разных диапазонах. рН раствора может быть измерен по соотношению высоты пиков данных спектров флуоресценции. В данной работе для калибровки и дальнейших прижизненных измерений рН использовано отношение интенсивности флуоресценции SNARF-1 между длиной волны 605 нм и 640 нм.

Было обнаружено, что спектр автофлуоресценции спинной части переона амфипод находится в функциональном диапазоне используемого красителя SNARF-1. Для решения этой проблемы комбинированный спектр, получаемый благодаря наложению спектра флуоресценции SNARF-1 и спектра автофлуоресценции, удалось разложить с помощью множественной линейной регрессии на 3 основных компонента: спектр флуоресценции протонированного SNARF-1, спектр

флуоресценции депротонированного SNARF-1 и спектр автофлуоресценции спинной части переона *E. verrucosus*. В используемой оптической системе эти спектры имеют пики около 610, 627 и 640 нм соответственно. Множественную линейную регрессию проводили в спектральном диапазоне 600-650 нм в пакете Scilab с помощью функции *regres* из панели инструментов Stixbox (Scilab Enterprises, 2012). После построения регрессионной модели, спектр автофлуоресценция вычитали из исходного спектра для расчёта соотношения интенсивностей флуоресценции SNARF-1 так же, как это было сделано для калибровочной линии. Благодаря данной процедуре удалось проводить измерения рН гемолимфы внутри системы кровообращения амфипод *in vivo*.

Измеренные с помощью инкапсулированных флуоресцентных сенсоров значения рН гемолимфы *E. verrucosus* в условиях акклимации согласуются с данными, полученными ранее с помощью рН-метра с микроэлектродом: показания инкапсулированных рН-сенсоров находились в диапазоне 7,9-8,3 с медианой 8,1, в то время как показания микроэлектрода колебались в диапазоне рН 8,05-8,15. Гиперкапническое воздействие привело к статистически значимому падению рН гемолимфы до уровня 7,5-8,0 с медианой 7,6, в то время как рН гемолимфы у контрольной группы амфипод остался на прежнем уровне.

Данный результат открывает широкие перспективы дальнейшего развития данной технологии для её применения в экофизиологических и экотоксикологических исследованиях на примере байкальских амфипод, а впоследствии — для разработки более эффективных методов экологического мониторинга озера Байкал и биотестирования.

Коллектив авторов благодарит Lena Jakob (Helmholtz Centre for Polar and Marine Research — Alfred Wegener Institute) за помощь в проведении данной работы.

Работа проведена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-14-10008 и РФФИ № 15-29-01003.

#### Литература:

1. Altenburger R. Future water quality monitoring-adapting tools to deal with mixtures of pollutants in water resource management./ R. Altenburger, S. Ait-Aissa, P. Antczak// *Sci Total Environ.*, 2015.
2. Chuiko G. M. Chemical contamination of the Rybinsk Reservoir, northwest Russia: Relationship between liver polychlorinated biphenyls (PCB) content and health indicators in bream (*Abramis brama*) / G. M. Chuiko, D. E. Tillitt, J. L. Zajicek // *Chemosphere.* – 2007. – V. 67. – I. 3. – P. 527-536.
3. Deutsch C. Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats/ C. Deutsch, A. Ferrel, B. Seibel, H. Pörtner, R. B. Huey // *Science* 2015– V. 348– P. 1132–1135.
4. Gil P. R. Nanoparticle-modified polyelectrolyte capsules/ P. R. Gil, L. L. Mercato, P. Pino, A. M. Javier, W. J. Parak // *Nanotody*, 2008 – V. 3 – P. 12–21.
5. Gurkov A. N. Injections of Encapsulated pH Sensor SNARF-1 do not Induce Apparent Stress Reaction in Larvae of Endemic Baikal *Caddisflies Baicalina thamastoides*. / A. N. Gurkov, I. A. Belousova, E. P. Shchapova, B. K. Baduev, K. P. Vereshchagina, M. A. Timofeyev // *journal of stress physiology & biochemistry*, 2016 – V. 12– No. 1 – P. 52-59.
6. Johnson I. & Spence M. T. Z. (2011) *Molecular Probes Handbook, A Guide to Fluorescent Probes and Labeling Technologies*. Life Technologies (Invitrogen), NY, USA.
7. Ruckh T. T. Implantable Nanosensors: Toward Continuous Physiologic Monitoring./ T.T. Ruckh, H.A. Clark// *Anal. Chem.*, 2014 – 86 (3) – P. 1314–1323.
8. Sadovoy A. V. Layer-by-Layer Assembled Multilayer Shells for Encapsulation and Release of Fragrance /A. V. Sadovoy, M. V. Lomova, M. N. Antipina, N. A. Braun, G. B. Sukhorukov, M. V. Kiryukhin // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, – 5 (18), – P. 8948–8954.
9. Sahari A. Development of an Optical Nanosensor Incorporating a pH-Sensitive Quencher Dye for Potassium Imaging./ Ali Sahari, Timothy T. Ruckh, Richard Hutchings, H.A. Clark// *Anal. Chem.*, 2015, – V. 87 (21), – P. 10684–10687.

10. Takhteev V. V. Checklist of the Amphipoda (Crustacea) from continental waters of Russia, with data on alien species / V. V. Takhteev, N. A. Berezina, D. A. Sidorov // *Arthropoda Selecta*, 2015 – V. 24 – P. 335-370.
11. Tsydenov B. O. Numerical Modelling of Pollutant Propagation in Lake Baikal during the Spring Thermal Bar. /B. O. Tsydenov, A. Kay, A. V. Starchenko// *Procedia Com.Science*, 2015 –V. 51 – P. 2658-2662.
12. Бородина Т.Н. Полиэлектrolитные микрокапсулы как системы доставки биологически активных веществ. / Т.Н. Бородина, Л.Д. Румш, С.М. Кунижев, Г.Б. Сухоруков, Г.Н. Ворожцов, Б.М. Фельдман, Е.А. Марквичева// *Биомедицинская химия*, 2007 – Т. 53, вып. 5, – С. 557-565.
13. Немова Н. Н. Амфиподы как индикаторы характера воздействия антропогенных факторов на прибрежные акватории белого моря / Н. Н. Немова, В. В. Богдан, Г. А. Шкляревич // *Ученые записки петрозаводского государственного университета*. – 2012. –Вып. 4. – С. 8-1.
14. Сороковикова Л. М. и др. Оценка качества вод притоков озера Байкал по химическим показателям / Л.М. Сороковикова, В.Н. Синюкович, И.В. Томберг, И.И. Маринайте, Т. В. Ходжер // *География и природные ресурсы* 2015 № 1 – С. 37–45.
15. Тахтеев В. В. Море загадок. Рассказы об оз. Байкал / В. В. Тахтеев. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2001. – 160 с.
16. Тимошкин О. А. Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна / О. А. Тимошкин [и др.] // *Новосибирск: Наука*, 2004. – Т. 2. – Библиогр.: с. 790.

## METHOD OF MICROENCAPSULATED FLUORESCENT SENSORS AS A PROMISING TECHNOLOGY FOR MONITORING OF MACROZOOBENTHOS OF LAKE BAIKAL

Ekaterina Pavlovna Shchapova,  
assistant researcher Institute of Biology at  
Irkutsk State University

E-mail: shchapova.katerina@gmail.com

Anton Nikolaevich Gurkov,  
Ph. D. student, Institute of Biology at  
Irkutsk State University

E-mail: a.n.gurkov@gmail.com

Irina Anatolievna Belousova, Ph.D.  
Institute of Biology at  
Irkutsk State University,  
Institute of Systematics and Ecology of Animals  
E-mail: [puza.ia@mail.ru](mailto:puza.ia@mail.ru)

Ekaterina Vitalievna Borvinskaya, Ph. D.  
Institute of Biology at Irkutsk State University  
Institute of Biology at Karelian Research Centre  
E-mail: katsu@inbox.ru

Boris Kuzmich Baduev,  
Ph.D., Institute of Biology at  
Irkutsk State University

E-mail: baduevbk@mail.ru

Igor Vladislavovich Meglinski,  
PhD, Professor,  
Institute of Biology at  
Irkutsk State University,  
University of Oulu

E-mail: Igor.Meglinski@oulu.fi

Maxim Anatolevich Timofeev,  
Dr. Sci., Professor,  
director of the Institute of Biology at  
Irkutsk State University  
E-mail: m.a.timofeyev@gmail.com

*Abstract:* In this work we demonstrate the possibility of *in vivo* monitoring of physiological parameters in macrobenthic animals using encapsulated fluorescent sensors. The common endemic amphipod species *Eulimnogammarus verrucosus*, widespread in the littoral zone of Lake Baikal, was chosen as the research object. Encapsulated pH-sensitive sensors were injected in the central hemolymph vessel for measuring hemolymph pH of the same animals at acclimation conditions and after exposure to hypercapnia. After exposure in hypercapnic conditions amphipods demonstrated acidification of their hemolymph pH, while the hemolymph pH of the control group was shown to be stable. This result opens new horizons for use of the *in vivo* diagnostic procedures in environmental monitoring.

*Keywords:* amphipods, Baikal, microencapsulated fluorescent sensors, *in vivo* diagnostics, environmental monitoring, stress