

A photograph of a sunset over a large body of water. The sun is a bright, glowing orb on the horizon, casting a long, shimmering path of light across the water's surface. The sky is a gradient of orange and yellow, with some wispy clouds. The water is dark, reflecting the light from the sun.

80 лет
развития лимнологии
в Институте озероведения
Российской академии наук



Российская Академия Наук

ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
обособленное структурное подразделение ФГБУН
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
(ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН)



80 ЛЕТ

РАЗВИТИЯ ЛИМНОЛОГИИ

В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Под редакцией
д.ф.-м.н. С.А. Кондратьева

Технический редактор – к.ф.-м.н. А.М. Расулова

Москва
2023

УДК 556; 504.064.2

ББК 20.1

В 76

Авторский коллектив:

*С.А. Кондратьев, В.М. Анохин, С.Д. Голосов, А.В. Гузева, В.В. Гузиватый, Д.С. Дудакова, И.С. Зверев,
Е.В. Иванова, Н.В. Игнатьева, А.В. Измайлова, С.Г. Каретников,
Н.Ю. Корнеенкова, Ю.В. Крылова, Е.А. Курашов, А.С. Митюков, М.А. Науменко,
О.А. Павлова, Ш.Р. Поздняков, А.М. Расулова, В.Н. Рыбакин, Т.В. Сапелко, Е.В. Станиславская,
Д.А. Тихонова, И.В. Токарев, И.С. Трифонова.*

Рецензенты:

чл.-корр. РАН А.А. Родионов, д.г.н. В.Н. Малинин

Рекомендовано к опубликованию
Объединенным советом наук о Земле СПб НЦ РАН
и Ученым советом СПб ФИЦ РАН

80 лет развития лимнологии в Институте озераедения Российской академии наук / Коллектив авторов. – М.: РАН, 2023. – илл. 178, с. 264.

Настоящая монография посвящена 80-летию Института озераедения Российской академии наук. Приведено описание наиболее важных этапов развития Института. Представлены основные направления исследований, проводящихся в настоящее время, а также наиболее важные научные и прикладные результаты, полученные за последние десятилетия. К их числу относятся оценка современных водных ресурсов России и мира, достижения в области изучения гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и геолого-геоморфологических процессов в крупнейшем пресноводном водоеме Европы – Ладожском озере, а также в малых озерах Северо-Запада и арктической зоны РФ, успехи палеолимонологического направления исследований. Кроме того, представлены результаты работ по изучению метаболомики водных организмов, исследованию причин токсичного «цветения» воды и разработке способов борьбы с ним, оценке загрязнения водных объектов микропластиком и развитию методов математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем».

Материалы, содержащиеся в книге, могут представлять интерес для широкой научной общественности, занимающейся вопросами изучения, охраны и рационального использования водных объектов.

This monograph is dedicated to the 80th anniversary of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. The most important stages of development of the Institute are described. The main directions of research conducted at present are presented, as well as the most important scientific and applied results obtained during the last decades. They include the assessment of modern water resources of Russia and the world, advances in the study of hydrological, hydrochemical, hydrobiological and geological-geomorphological processes in the largest freshwater body of water in Europe – Lake Ladoga as well as in small lakes of the Northwest and the Arctic zone of Russia, successes of paleolimnological research. In addition, the results of studies on metabolomics of aquatic organisms, causes of toxic «blooming» of water and development of ways to combat it, evaluation of water pollution by microplastics and development of methods for mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the «watershed-watercourse-water body» system are presented.

Materials contained in the book can be of interest for the general scientific community engaged in the issues of study, protection and rational use of water bodies.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
СОКРАЩЕНИЯ	5
Глава 1. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ЛИМНОЛОГИЯ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ИНСТИТУТА ОЗЕРОВЕДЕНИЯ (И.С. Трифонова, С.А. Кондратьев)	6
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕРНОГО ФОНДА И ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА НАЦИОНАЛЬНОМ, КОНТИНЕНТАЛЬНОМ И ГЛОБАЛЬНОМ УРОВНЕ (А.В. Измайлова, А.М. Расулова, Н.Ю. Корнеевкова)	24
Глава 3. ИЗУЧЕНИЕ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ КОНТАКТНО- ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ. ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ОЗЕРА (М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников)	40
Глава 4. РАБОТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ПРИТОКОВ (Е.А. Курашов)	59
Глава 5. ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ЛАНДШАФТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА (В.М. Анохин, Д.С. Дудакова, В.Н. Рыбакин, И.В. Токарев)	74
Глава 6. ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР	90
6.1. Исследование малых озер и озерно-речных систем бассейна Ладожского озера и Финского залива. (Н.В. Игнатьева, Е.В. Станиславская)	90
6.2. Изучение озер Карельского перешейка. (И.С. Трифонова)	102
6.3. Изучение водоемов урбанизированных ландшафтов. (Н.В. Игнатьева, О.А. Павлова)	113
6.4. Опыт изучения и практического использования сапропеля. (А.С. Митюков)	129
Глава 7. ИЗУЧЕНИЕ ОЗЕР АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ (С.А. Кондратьев, А.В. Гузева, А.М. Расулова)	138
Глава 8. ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН (Т.В. Сапелко)	156
Глава 9. РАБОТЫ В ОБЛАСТИ МЕТАБОЛОМИКИ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ (Е.А. Курашов, Ю.В. Крылова)	168
Глава 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТОКСИЧНОГО «ЦВЕТЕНИЯ» ВОДЫ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ БОРЬБЫ С НИМ (В.Н. Рыбакин)	178
Глава 11. РАБОТЫ ПО КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА И НАНОЧАСТИЦ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ (Ш.Р. Поздняков, Е.В. Иванова, Д.А. Тихонова)	192
Глава 12. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ (С.А. Кондратьев, С.Д. Голосов, И.С. Зверев)	202
ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ	223
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	224

ВВЕДЕНИЕ

В 2024 году Институт озераедения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра РАН (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН) отмечает свой восьмидесятилетний юбилей.

ИНОЗ сформировался на базе Лаборатории озераедения, организованной в 1944 г. по инициативе выдающегося ученого-лимнолога Г.Ю. Верещагина в составе Отделения Геолого-географических наук АН СССР. В 1971 г. Лаборатория была преобразована в Институт озераедения, который в настоящее время входит в состав Отделения наук о Земле РАН. Институт является ведущим научным учреждением России в области лимнологии. Лимнология – комплексная наука. Ее цель – всестороннее изучение водоемов в сложном взаимодействии происходящих в них физических, химических, геологических, географических, биологических процессов и воздействий человека. Основными объектами лимнологических исследований являются водоемы, характеризующиеся замедленным водообменом (озера, водохранилища, эстуарии). Эти природные объекты издавна имели огромное значение в жизни человека, однако ухудшение экологической обстановки приводит к катастрофической потере их ценных природных качеств или просто к исчезновению (limno.ru).

ИНОЗ занимается разработкой теоретических и прикладных основ лимнологии, методов углубленного комплексного изучения структурно-функциональных особенностей озерных экосистем, восстановления озер и водохранилищ, их использования для целей питьевого водоснабжения, рыбоводства и рекреации, решением проблем мониторинга и управления озерами, рационального использования их природных ресурсов. В научно-организационную структуру Института входят 5 научных лабораторий: географии и гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, комплексных проблем лимнологии, математических методов моделирования.

Институт озераедения гордится своей славной историей. В нем работали известные ученые, из них – 5 академиков и 3 члена-корреспондента АН СССР и РАН АН. За значительный вклад в развитие отечественной и мировой науки многие удостоены высоких правительственных наград: трое имели звание «Герой социалистического Труда», пятеро удостоены Государственных премий по науке и технике, 25 ученых награждены правительственными орденами и медалями. Многие сотрудники Института являются лауреатами различных специальных премий Академии наук, Российских и Международных научных обществ.

Экономической основой деятельности Института является базовое финансирование из государственного бюджета России, целевое финансирование государственных научных программ, конкурсных проектов Российского научного фонда, и средства, получаемые от договоров с заинтересованными заказчиками.



СОКРАЩЕНИЯ

АГК – анализ методом главных компонент
АУЗС – Автономная ультразвуковая станция
АЧР – Азиатская часть России
БД – базы данных
БПЛА – беспилотный летающий аппарат
БЭВ – безазотистые экстрактивные вещества
ВКС – верхний квазигомогенный слой
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения
ГВ – гуминовые вещества
ГИС – геоинформационные системы
ГХ/МС – газовая хромато-масс-спектрометрия
ЕЧР – Европейская часть России
КЕПС – Комиссия по изучению естественных производительных сил России
КЗС – Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений
КРС – крупный рогатый скот
МБП – Международная Биологическая Программа
МГВМ – математическая модель гидродинамики внутреннего моря
МДУ – максимально допустимый уровень
НДТ – наилучшие доступные технологии
НМ – низкомолекулярный метаболит
НМП – низкомолекулярные метаболические профили
НОС – низкомолекулярные органические соединения
НУВ – нефтяные углеводороды
ОКБ – общие колиформные бактерии
ОМЧ – численность сапрофитных бактерий
ООПТ – особо охраняемые природные территории
ОР – основной рацион
ОЧБ – общая численность бактериопланктона
ПДБМ – План действий по Балтийскому морю
ПДК – предельно допустимые концентрации
ПП – первичная продукция
ППП (или ппп) – потери при прокаливании
РАЭ – Российская антарктическая экспедиция
РГО – Русское географическое общество
РОВ – растворенное органическое вещество
СВС – Северная водопроводная станция
ТМ – тяжелые металлы
ТНПА – телеуправляемый необитаемый аппарат
ТОС – общий органический углерод
УДГСС – ультрадисперсные гумато-сапропелевые суспензии
ФК – фульвокислоты
ХЕЛКОМ – Хельсинская конвенция по Балтийскому морю
ЦМР – цифровая модель рельефа
ЦСА – Центральная станция аэрации
ЮЗОС – Юго-Западные очистные сооружения
GEE – Google Earth Engine
GLDAS – Global Land Data Assimilation System
IBGP – International Biosphere Geosphere Program
LSD – наименьшая значимая разность
MCC – метод максимальной кросс-корреляции

Глава 1

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ЛИМНОЛОГИЯ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ИНСТИТУТА ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

Лимнология (от греческого «λίμνη» – «озеро») или озероведение – наука о континентальных водоёмах с замедленным водообменом (озёрах, водохранилищах), изучающая весь комплекс взаимосвязанных физических, химических и биологических процессов, протекающих в них. При исследовании водоёмов лимнология использует методы гидрологии, гидробиологии, гидрохимии, гидрофизики, геоморфологии, геоботаники, метеорологии и других наук. Среди ее основоположников были выдающиеся ученые разных направлений науки.

Считается, что начало лимнологии положено швейцарским ученым Франсуа Форелем, проводившим многолетние исследования на Женевском озере и создавшим первое руководство по лимнологии [Forel, 1901]. Среди зарубежных лимнологов хорошо известны имена Э. Берджа, А. Тинемана, Э. Наумана, Ф. Руттнера, К.Х. Мортимера, Дж.Э. Хатчинсона и многих других. В 1895 г. на VI Международном географическом конгрессе в Лондоне лимнология оформилась как отрасль географической науки. Большую роль в развитии лимнологии сыграли международные лимнологические конгрессы и симпозиумы, с 1922 г. регулярно созываемые Международной ассоциацией теоретической и прикладной лимнологии (SIL), из которых 3-й в 1925 г. и 18-й в 1971 г. проводились в СССР.

В России развитие лимнологии началось практически в то же время, что и в Европе – в середине XIX в. Большое значение для развития этой науки имели труды русских озероведов: Д.Н. Анучина, Л.С. Берга, Г.Ю. Верещагина, И.В. Молчанова, Б.Б. Богословского, С.Д. Муравейского, С.И. Кузнецова, Л.Л. Россоломо, В.И. Жадина, Г.Г. Винберга и многих других. Исследования русских и советских лимнологов занимали почетное место в мировой науке [Анучин, 1896; 1898; Берг, 1908; 1949; Верещагин, 1930; 1933; 1947; Россоломо, 1934; Винберг, 1934; Богословский, 1960; Богословский, Муравейский, 1955]. Еще в дореволюционное время был выполнен ряд замечательных исследований крупнейших озер и озерных районов, основано несколько лимнологических станций.

Глебу Юрьевичу Верещагину (рис. 1.1) принадлежит значимая роль в становлении и развитии отечественной лимнологии. В 1916 г., уже будучи сотрудником Зоологического музея АН, Г.Ю. Верещагин совершил свои первые экспедиции на Байкал под руководством Виталия Чеславовича Дорогостайского.



Рис. 1.1. Глеб Юрьевич Верещагин (1889–1944)

В 1915 г. Верещагин, в качестве секретаря Озерной комиссии Русского географического общества (РГО), составил программы предварительного исследования озер. Озерная комиссия РГО была первым общественным объединением лимнологов в России.

В 1919–1924 гг. деятельность Г.Ю. Верещагина протекала главным образом в Государственном гидрологическом институте (ГГИ), где он возглавлял Озерный отдел. В 1919 г. при содействии ГГИ и Зоологического музея под его руководством была организована Олонецкая научная экспедиция. У Г.Ю. Верещагина сложилось свое направление в лимнологии, которое он формулировал как «изучение природы озёр, как целого, для установления количественных закономерностей процессов и явлений в них протекающих и их взаимной связи с окружающей средой в целях возможно более полного освоения озёрных фондов в различных отраслях народного хозяйства» [Верещагин, 1933]. К концу 1930-х гг., создав школу озероведов, Г.Ю. Верещагин сформировал собственное комплексное направление в лимнологии. В это время у него появилась идея о создании в стране озероведческого центра для широкомасштабного изучения озер различных регионов страны с разнообраз-

ными особенностями окружающих их природных комплексов. Надо было подвести под разносторонние исследования единую концепцию комплексной лимнологии, как важной отрасли географии. Глеб Юрьевич подготовил Проект Постановления Президиума АН СССР о создании Лаборатории озероведения, передав в ее ведение и Байкальскую лимнологическую станцию. В январе 1944 г. вышло постановление Президиума Академии Наук СССР о создании Всесоюзной Лаборатории озероведения в составе Отделения геолого-географических наук в Ленинграде, а Г.Ю. Верещагин был назначен ее директором. Но 5 февраля 1944 г. он внезапно скончался от кровоизлияния в мозг. Верещагин Г.Ю. – крупнейший учёный, идеи которого послужили основой создания Лаборатории озероведения, а его ученики стали ее первыми сотрудниками и организаторами.

После кончины Г.Ю. Верещагина директором Лаборатории был назначен Николай Михайлович Страхов (будущий академик). Однако в 1945 г. по личной инициативе Н.М. Страхов был освобожден от должности. Его приемником на должности директора лаборатории стал выдающийся геолог, академик Дмитрий Васильевич Наливкин (рис. 1.2). Следуя замыслу Г.Ю. Верещагина, он наладил работу Лаборатории и определил ее основное направление. Согласно постановлению Президиума АН СССР «основной задачей Лаборатории является разработка теоретических вопросов озероведения – происхождение и история развития главнейших типов озер, изучение водного химического и термического баланса озер, минеральной, энергетической, растительной и животной сырьевой базы, влияния озер на климат». Как геолог Д.В. Наливкин считал необходимым использовать исторический подход к изучаемым процессам в озерах с целью познания их эволюции, акцентируя внимание на практическом значении водоемов как объектов накопления полезных ископаемых. Наливкин Д.В. пригласил на должность ученого секретаря Николая Ивановича Семеновича, который с 1940 г. был руководителем группы кадастра озер Северо-Запада в ГГИ и занимался изучением озер Лача, Воже, Кубенское, Ильмень, Балхаш и Аральского моря. Семенович Н.И., будучи ученым с широкой эрудицией, по существу явился организатором Лаборатории озероведения, основу которой составили ученики Г.Ю. Верещагина: В.А. Толмачев, Т.Б. Форш-Меншуткина, Л.Ф. Форш, Г.В. Лопатин, В.М. Катанская и др.

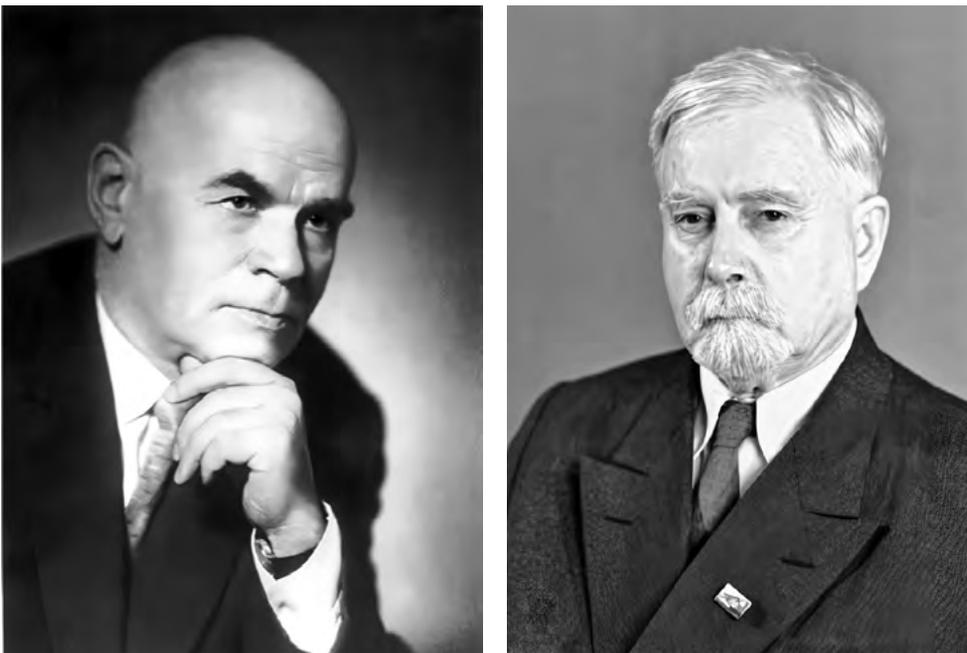


Рис. 1.2. Николай Михайлович Страхов (1900–1978); Дмитрий Васильевич Наливкин (1889–1982)

К 1949 г. Лаборатория озероведения АН СССР сформировалась как центральное научное учреждение с двумя лимнологическими станциями – Байкальской и станцией на оз. Красном (Карельский перешеек). В 1953 г. Байкальская станция была передана Сибирскому филиалу АН СССР, и впоследствии преобразована в Лимнологический институт Сибирского отделения АН.

Уже при рекогносцировочном характере работ на Карельском перешейке Н.И. Семеновичем был применен комплексный подход к изучению озер, в котором большая роль отводилась гидробиологическим исследованиям. При небольшом коллективе сотрудников в его состав входили гидрологи, гидрохимики и гидробиологи. Семенович Н.И. принимал участие во всех экспедиционных выездах на озера, выполняя гидрохимические исследования и исследования донных отложений. В первые годы существования Лаборатория озераедения АН СССР сумела объединить крупнейших специалистов-озераедов, воспитать молодые квалифицированные кадры и создать коллектив, способный решать теоретические и практические проблемы лимнологии.

В 1955 г. директором Лаборатории озераедения стал выдающийся географ, будущий академик Станислав Викентьевич Калесник (рис. 1.3). По его инициативе в 1960-е гг. были начаты фундаментальные комплексные исследования Ладожского и Онежского озер. Одновременно Лабораторией проводились исследования динамики состояния озер семиаридной зоны и их истории, как современной, так и в эпоху голоцена, изучены ритмические проявления в истории озер под руководством Арсения Владимировича Шнитникова.



Рис. 1.3. Станислав Викентьевич Калесник (1901–1977)

В 1960-е гг. в Лаборатории озераедения сложилось географическое направление комплексного изучения озер в единстве с окружающим ландшафтом [Калесник, 1967]. Значительно увеличился штат Лаборатории, были выделены сектора по основным направлениям лимнологии. Сектор географии возглавил к.г.н. Н.И. Семенович. На должность заведующего сектора гидрологии был приглашен крупный гидролог и лимнолог, д.г.н. Борис Борисович Богословский. Заведующим сектора гидрохимии стал вернувшийся в Ленинград выдающийся гидрохимик, член-корреспондент АН СССР Олег Александрович Алекин. В 1962 г. С.В. Калесник пригласил известного морского гидробиолога Ивана Ивановича Николаева, который сначала возглавил Лимнологическую станцию, а с ноября 1963 г. сектор гидробиологии. На Лимнологической станции по инициативе И.И. Николаева было начато комплексное изучение лимнологических циклов, которое в дальнейшем явилось основой продукционных работ и многолетнего мониторинга оз. Красного.

Ладожская экспедиция в составе 16 отрядов проводила свои исследования в течение семи лет (1956–1962) сначала под руководством Василия Александровича Толмачева, а затем, после его безвременной кончины, с 1960 г. под руководством гидролога Евгения Александровича Попова.

Несмотря на большие трудности, связанные со скромным финансированием и слабой технической базой (прошло всего 10 лет после окончания войны), экспедиция собрала огромный материал, в том числе и совсем новые для Ладожского озера данные. Программой исследований предусматривались следующие основные направления, по каждому из которых в составе экспедиции действовала специальная группа: термический режим и тепловой баланс (Н.П. Смирнова, А.И. Тихомиров, К.А. Мокиевский, А.Ф. Изотова, Т.А. Татарина, Л.С. Александрова, А.М. Крючков), водный баланс и динамика вод (Т.И. Малинина, А.Н. Охлопкова, В.А. Кириллова, М.Ф. Веселова), гидрооптические характеристики вод (В.Б. Румянцев), гидрохимический режим озера (В.А. Толмачев, Т.Б. Форш-Меншуткина, Д.З. Ульянова, Э.Э. Шерман), гидрохимия притоков (Н.Ф. Соловьева, Г.Ф. Расплетина), микробиология (Д.Н. Камешкова), фитопланктон (Н.А. Петрова), высшая водная растительность (И.М. Распопов, М.А. Рычкова), зоопланктон (Р.С. Деньгина), зообентос (Г.А. Стальмакова, Т.Д. Слепухина), донные диатомовые водоросли (Н.Н. Давыдова). В ходе работ были уточнены морфометрические характеристики озерной котловины. Подробные актинометрические наблюдения завершились расчетом среднего годового радиационного баланса. Новым словом в науке были результаты исследования особенностей термического режима Ладоги Алексеем Ивановичем Тихомировым, приведшие к детальному описанию термического бара в периоды весеннего прогрева и осеннего охлаждения озера [Тихомиров, 1982]. Исследованиями, проведенными в разные годы, удалось установить, что термический бар выполняет роль барьера между теплой и холодной зонами, существенно ослабляя перенос и перемешивание вод, а также транспорт взвешенных и растворенных веществ. В результате, термобар влияет не только на неоднородность прогрева водных масс, но и на особенности химических и биологических процессов. Впервые был подсчитан тепловой баланс Ладожского озера, изучены стгонно-нагонные колебания уровня и сейши; подсчитан средний многолетний среднегодовой уровень Ладоги, уточнен водный баланс Ладожского озера.

На Ладожском озере и озерах Карельского перешейка под руководством Н.И. Семеновича проводились палеолимнологические исследования. В 1956 г. в рамках Ладожской комплексной экспедиции организован отбор кернов донных отложений. В результате по всей акватории озера были составлены схемы распределения различных типов донных отложений, особенностей гранулометрического состава, схемы распределения по площади дна углекислоты, серы, азота, фосфора, макро- и микроэлементов. Были сделаны первые заключения по особенностям осадконакопления в озере. Впервые была предпринята попытка биостратиграфического расчленения донных отложений по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов [Абрамова, Давыдова, 1966; Абрамова, Давыдова, Квасов, 1967; Давыдова, 1985]. Было установлено, что на протяжении всего голоцена морские воды не проникали в Ладожскую котловину [Абрамова, Давыдова, Квасов, 1967], чем был фактически положен конец многолетней дискуссии о балтийско-беломорском соединении. Монография «Донные отложения Ладожского озера» Н.И. Семеновича [1966] явилась итогом первых комплексных исследований донных отложений Ладожского озера. История дальнейших многолетних палеолимнологических исследований Ладожского озера описана в последней монографии ИНОЗ РАН «Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата», которая вышла в 2021 г. [История и методика палеолимнологических..., 2021]. С 1960-х гг. палеолимнологические исследования в рамках экспедиции Лаборатории озераведения начали проводиться на Онежском озере. Результатом этих работ стала монография «Палеолимнология Онежского озера» [1976]. В 1980-х гг. в рамках совместных работ с эстонскими коллегами начато комплексное исследование Псковско-Чудского озера [Давыдова, 1981]. В 1970-е годы экспедиционные исследования Института, включающие изучение донных отложений озер, начаты на Кольском полуострове [Большие озера Кольского, 1975]. Весомый вклад в исследование озер полуострова внес сотрудник Сектора палеолимнологии, к.г.н. Борис Иванович Кошечкин, изучавший геоморфологию и тектонику Кольского полуострова [Кошечкин, 1979]. В 1970-е гг. также начаты палеолимнологические исследования на озерах Южного Урала [Ландшафтный фактор..., 1978], которые были продолжены в 1980-е гг. [Южный Урал..., 1995; Argayash Lake, Cheliabinsk..., 1996]. Более подробно с историей развития палеолимнологических исследований в Лаборатории и Институте озераведения можно ознакомиться в главе 8.

На основе материалов комплексной экспедиции были детально изучены распространение и обилие бактерий, фитопланктона, зоопланктона, бентоса, высшей водной растительности. Установлено,

что в фитопланктоне по числу видов господствуют диатомовые и зеленые водоросли. Высшая водная растительность занимала менее 0,5 % площади озера. Биомасса зообентоса, различная в разных биотопах, в среднем составляла 2 г/м² озерного дна. Был сделан вывод, что в целом Ладожское озеро не очень богато кормовыми ресурсами, но при разумной организации лова и бережном отношении к рыбным запасам здесь можно добывать ежегодно до 50 тыс. ц рыбы в год без ущерба для производительности озера [Растительные ресурсы Ладожского..., 1967].

После окончания работы комплексной Ладожской экспедиции была организована аналогичная экспедиция по изучению Онежского озера, работавшая по той же программе и с тем же составом исполнителей в течение 1964–1967 гг. под руководством И.И. Николаева. Для Онежского озера были составлены карты течений, для чего использован метод термодинамических расчетов и большое число инструментальных наблюдений. На фоне общего слабого прогрева вод выявлена их большая термическая неоднородность в безледный период и характерные черты этой неоднородности, связанные с образованием четкого и длительно существующего термобара. В проблеме охраны вод Онежского озера следует учитывать также большую продолжительность зимнего сезона (полгода), во время которого интенсивность микробиологических процессов, а следовательно, и самоочищительная способность вод, сильно понижены. Именно зимой загрязненные воды Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината распространялись особенно далеко, достигая открытой части озера.

В 1971 г. на Лабораторию озераведения, как на ведущее научное учреждение, была возложена организация XVIII Лимнологического Конгресса в Ленинграде, и она, по всеобщему признанию, успешно с ней справилась. В этом же году усилиями С.В. Калесника Лаборатория была преобразована в Институт озераведения в составе Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР.

В том же 1971 г. организована библиотека Института озераведения на основе существовавшей с 1945 г. библиотеки Лаборатории озераведения ЛГУ им. А.А. Жданова (http://www.rasl.ru/b_resours/set/geo_set/inozran.php). В 1979 г. библиотека Института получает статус сектора БАН при Институте озераведения АН СССР и с этого времени начинает регулярно комплектовать свои фонды через БАН. Сотрудниками сектора БАН при ИНОЗ по согласованию с дирекцией Института был организован временный подсобный фонд специальной литературы в помощь исследованиям на Лимнологической станции, который располагался там до 2020 г., а затем был возвращен в основное хранилище библиотеки.

Суммарный фонд библиотеки составляет свыше 70 тыс. единиц хранения, включает в себя издания на русском, английском, французском и немецком языках. Хронологические рамки фонда – с конца XIX века по настоящее время. В фонде представлены следующие научные направления: озераведение, палеолимнология, гидрология, океанология, гидрохимия, гидрогеология, география, геоморфология, гидробиология, метеорология, экология, ихтиология, история науки. Видовая структура фонда: книги, брошюры, оттиски, периодические издания, справочная литература, информационные и библиографические издания, диссертации, авторефераты диссертаций, архивные материалы экспедиций института, карты, атласы. Справочно-библиографический аппарат библиотеки включает традиционные и электронный (ведется с 2007 г.) каталоги. Имеются картотеки периодики, работ сотрудников, авторефератов и тематическая картотека «Балтика» (озера Северо-Запада, Ладожское озеро, Финский залив). В 1976 г. коллекция Н.И. Семеновича передана в фонд научной библиотеки самим ученым. Тематические рамки коллекции: осадконакопление, география, океанология, гидробиология озер. Коллекция А.О. Алекина включает в себя личную библиотеку директора Института озераведения (1976–1982). В собрании представлена литература по гидрохимии, гидрологии, лимнологии. В фонде также представлена наиболее полная коллекция Государственного водного кадастра. За длительное время своей работы библиотека в ИНОЗ РАН стала уникальным собранием литературы по лимнологии.

С 1962 по 1974 гг. комплексная ландшафтно-лимнологическая экспедиция Института провела исследования на озерах, расположенных в различных географических зонах: в средней тайге Карельского перешейка, зоне подтайги Валдайской возвышенности, лесотундре и северной тайге Кольского полуострова, южной тайге и лесостепи Южного Урала. Изучение озер в различных физико-географических зонах и в условиях отсутствия значительного антропогенного пресса позволило выявить зональные различия структуры озерных экосистем. На основе полученных данных сделан

вывод о том, что прежде всего соотношение аллохтонного и автохтонного органического вещества можно рассматривать как зональный признак. Уменьшение модуля стока и проточности озер с переходом в более южные географические зоны приводит к уменьшению роли аллохтонного органического вещества в структуре экосистем озер. Основным итогом исследований явилось установление характера связи между теми компонентами природной среды, которые являются определяющими в формировании лимнологического состояния озер, и процессами, происходящими в них. Результаты экспедиций представлены в монографии В.Г. Дробковой и И.Н. Сорокина «Озеро и его водосбор – единая природная система» [1979].

В 1978 г. после смерти С.В. Калесника директором Института стал член-корреспондент РАН Олег Александрович Алекин (рис. 1.4), который большое внимание уделял развитию гидрохимических исследований современными методами. Был значительно расширен штат гидрохимической лаборатории, приглашены специалисты, владеющие методами хроматографии и спектрального анализа. В первую очередь были расширены исследования состава органического вещества, определения биогенных элементов, прежде всего, общих форм азота и фосфора, нефтепродуктов, тяжелых металлов и т.д. Внедрение современных методов определялось тем, что основным направлением исследований Института озераведения стала проблема эвтрофирования больших и малых озер, в решении которой роль гидрохимии была определяющей. Были рассчитаны биогенные нагрузки на Ладожское озеро и ряд малых озер, проведена количественная оценка критических нагрузок, позволяющих прогнозировать состояние озер и планировать их восстановление и оптимизацию режима.



Рис. 1.4. Олег Александрович Алекин (1908–1995)

Важным этапом явилось участие Института в работе по Международной Биологической Программе (МБП). Под руководством Георгия Георгиевича Винберга исследования по МБП проводились в СССР на 13-ти водоемах, расположенных в разных географических регионах страны. Для озера Красного собран наиболее полный материал, включающий ежедекадные отборы проб в вегетационный период и ежемесячные – в период ледостава. Подробные исследования сообществ гидробионтов с использованием методов расчета их продукции и учетом гидрологических и гидрохимических факторов завершились составлением годового биотического баланса. На северо-западе оз. Красное оказалось единственным водоемом, где в годовом балансе были представлены натурные данные за подледный период. Результаты работы по МБП докладывались на двух промежуточных конференциях – в 1972 г. в Варшаве, и в 1973 г. в Минске. С результатами можно ознакомиться в коллективной монографии «Биологическая продуктивность оз. Красного» [1976].

В 1970-е годы ИНОЗ был привлечен к выполнению Государственной темы по составлению прогноза экологических последствий предполагаемой переброски вод северных рек в бассейн р. Волги. На северо-западе Европейской территории России в Вологодской и Архангельской областях на трассе этой переброски расположены крупные озера – Кубенское [Озеро Кубенское, 1977], Воже и Лача [Гидрология озер Воже и Лача, 1978; Гидробиология озер Воже и Лача, 1978]. Для составления экологического прогноза были необходимы сведения о современном состоянии и особенностях режима этих больших мелководных озер. На основе Ладожской экспедиции была создана Вологодско-Архангельская экспедиция, которая в 1972–1975 гг. проводила исследования под руководством Тамары Ивановны Малининой и Игоря Михайловича Распопова. Получена всесторонняя характеристика озер, причем, многие компоненты озерных экосистем Воже, Лача и Кубенское описаны впервые. Дан прогноз изменений в экосистемах озер при осуществлении первого этапа переброски вод. Ихтиологами был представлен развернутый прогноз изменений в видовом составе рыбного населения, согласно которому наиболее важным результатом была бы потеря нерестилищ ценных пород рыб, связанная с затоплением торфяников на берегах оз. Воже.

В 1970–1980 годах была организована гидрофизическая экспедиция под руководством проф. Нахима Ароновича Лабзовского и Николая Николаевича Филатова, позволившая провести уникальные эксперименты по изучению течений, турбулентности, термического бара, внутренних волн, циркуляции Ленгмюра на крупнейших озерах страны, которые впоследствии стали основой для математических моделей, разрабатываемых Институтом озераведения (глава 3 и глава 12).

Многолетний ряд наблюдений (1964–1975) на оз. Красном позволил выявить начальный этап процесса антропогенного эвтрофирования, выделить наиболее четкие показатели перехода водоема из одного трофического статуса в другой. Впервые на основе натуральных наблюдений была рассчитана биогенная нагрузка на озеро по Фолленвейдеру. Наиболее заметной реакцией на антропогенное эвтрофирование в центральной части озера было повышение продуктивности фитопланктона и массовое развитие цианопрокариот [Эвтрофирование мезотрофного озера, 1980].

С 1980-х годов Институтом проводятся комплексные исследования, направленные на решение проблемы антропогенного эвтрофирования озер, включавшие и работы по донным отложениям [Трифонов, Давыдова, 1981; Антропогенное эвтрофирование Ладожского..., 1982 и др.]. Помимо озер гумидной зоны палеолимнологические исследования проводились и на водоемах аридной зоны: Балхаше, Иссык-Куле, Зайсане, на горных озерах Памира и Тянь-Шаня, озерах Заповедника «Боровое». Результаты изучения древних озерных отложений на аридных территориях Казахстана и Монголии дали возможность реконструировать палеоэкологические условия различных геологических эпох, выявить основные закономерности осадконакопления в древних озерах и условия развития озерных водоемов геологического прошлого.

Более подробное описание первого сорокалетнего периода развития отечественной лимнологии и Лаборатории (Института) озераведения представлено в юбилейной монографии, посвященной семидесятилетию ИНОЗ [70 лет Институту озераведения..., 2017].

В 1982 г. директором Института был назначен академик Алексей Федорович Трешников (рис. 1.5). Последующий период времени, предшествующий образованию Российской академии наук, в деятельности Института был очень плодотворным. В этот период ИНОЗ являлся головной организацией и непосредственным участником работ по программам Государственного комитета СССР по науке и технике в области исследований всех крупнейших озер Советского Союза. Проводились комплексные экспедиции на озерах различных географических зон, среди которых: Ильмень, Белое, Псковско-Чудское, Кубенское, Севан, Чаны, Балхаш, Зайсан, Иссык-Куль, Таймыр др. Особое внимание уделялось Ладожскому и Онежскому озерам, ежегодные исследования на которых проводились на трех научно-исследовательских судах Института: «Талан» – водоизмещение 265 т, «Лимнения» – водоизмещение 126 т, «К. Дерюгин» – водоизмещение 80 т и маломерном судне «Бит». Работы выполнялись совместно с более чем 80 организациями Академии наук и различными министерствами и ведомствами союзного и республиканского подчинений. Цель исследований заключалась в комплексном изучении существующих опасных для экономики экологических проблем и поиске путей их разрешения. Вследствие распада СССР эти крупномасштабные исследования были прекращены и продолжались совместно с организациями бывших союзных республик лишь по проблеме происхождения и эволюции озер территории Советского Союза [Румянцев, Кондратьев, 2022].



Рис. 1.5. Алексей Федорович Трешников (1914–1991)

В 1982 г. в Институте была организована первая в стране Лаборатория дистанционного зондирования, специализирующаяся на изучении озер с помощью аппаратуры, установленной на аэро- и космических (спутниковых) носителях (см. главу 2). Её руководитель, академик АН СССР Кирилл Яковлевич Кондратьев – выдающийся ученый в области физики атмосферы, климатологии, дистанционных методов. Инновационные методы исследований использовались для определения ряда важных параметров состояния водоема, а именно: температуры и волнения водной поверхности, снежного и ледяного покрова. Особенно большое внимание уделялось изучению характеристик качества воды, ее оптических свойств, оценке биомассы фитопланктона по содержанию хлорофилла, концентрации растворенного органического вещества. Для разработки дистанционных методов контроля параметров качества воды данных озер требовалась опорная информация, собранная непосредственно на водоеме. Комплексные полевые измерения соответствующих величин в режиме «судно-самолет-спутник» и последующая интерпретация полученных результатов составила основу исследований Лаборатории. Тестовыми полигонами явились озера Ладожское, Онежское и Севан. На основе численного моделирования и данных натурных наблюдений были разработаны методы определения свойств озерных вод по данным измерения яркости водной поверхности (коэффициент спектральной яркости) и флуоресценции воды. Дистанционные методы позволили провести сравнение состояния водных масс озер Ладожского, Онежского и Великих озер Америки. Исследования проводились в тесном сотрудничестве с учеными Канады. Огромной заслугой академика К.Я. Кондратьева была организация нескольких международных многоуровневых экспериментов по изучению внутренних водоемов на Рыбинском водохранилище, водосборе р. Сить, а также в Болгарии на водохранилище Пчелина.

В 1980-х годах на Лимнологической станции на озере Красном активно развивались новые методы исследований по гидрофизике, гидрохимии, гидробиологии. Разработана методика изучения распространения и трансформации загрязнённых вод. Успешно велись работы по диагностике и прогнозу экологического состояния водоемов на основе методов математического моделирования

и дистанционных зондирования Земли. Под руководством начальника станции д.ф.-м.н. Константина Дмитриевича Креймана был разработан и построен парк лабораторных установок для проведения исследований основных процессов тепло- и массопереноса в системе приземный слой атмосферы – водная масса – донные отложения. Наиболее значимые результаты были получены с использованием лабораторного комплекса под названием «Аэрогидроканал» и установки для изучения особенностей взаимосвязанных процессов переноса тепла и массы через границу раздела вода – дно (см. главу 12) [Golosov, Zverev, Terzhevik, 1998]. Экспериментальные работы на акватории позволили собрать материал, необходимый для верификации модели гидротермодинамики озера [Моделирование процессов тепломассопереноса..., 1992].

С середины 1980-х по 1990-е гг. важную страницу палеолимнологических исследований ИНОЗ составляют работы, выполненные на территории Монголии в составе совместных Советско-Монгольской палеонтологической и геологической экспедиций АН СССР и АН МНР. Цель работ – выявления минеральных и биологических ресурсов озер Монголии. Объектами изучения являлись континентальные осадочные толщи плейстоцена и голоцена. Основные результаты комплексных исследований Института озераедения в Монголии были опубликованы в коллективной монографии «Лимнология и палеолимнология Монголии» [1994]. Под руководством А.В. Шнитникова была организована Тянь-Шанская экспедиция, в рамках которой решались вопросы плейстоценовой и голоценовой истории озер, выявление особенностей колебаний ледников и озер. Основными объектами изучения стали крупные высокогорные озера Тянь-Шаня – Иссык-Куль, Чатыркуль и Сонкуль и многочисленные малые горные озера различного происхождения [Севастьянов, 1983].

В 1988 г. директором Института избирается д.г.н. (ныне академик РАН) Владислав Александрович Румянцев (рис. 1.6). Вскоре ИНОЗ АН СССР переходит в подчинение Российской академии наук (РАН). В 1991–1994 гг. были подготовлены 4 завершающих тома, которые вместе с предыдущими образовали монографическую серию из 8 томов «История озер». Издание включает как давно исчезнувшие с поверхности Земли озера, представляющие большой интерес для понимания происходящих в природе общих закономерностей ее развития и поиска полезных ископаемых, так и современные уникальные озера, такие, как Байкал, Ладога, Онега, Балхаш, Иссык-Куль, Севан и т.д., а также озерные регионы с огромным множеством малых водоемов. При этом представлен как процесс происхождения озер, так и их эволюции в тесной связи с имевшими место изменениями климата и природной среды на водосборных бассейнах. По масштабу охвата во времени (от триаса до современного периода) и территории бывшего СССР с ее огромным физико-географическим разнообразием, комплексности проработок огромной базы разносторонних данных, глубины заключений и выводов издание не имеет аналогов в мировой научной практике и получило высокую оценку отечественных и зарубежных ученых. Оно подвело итоги палеолимнологических исследований XX века и до сих пор остается уникальным в этой области науки (см. главу 8).

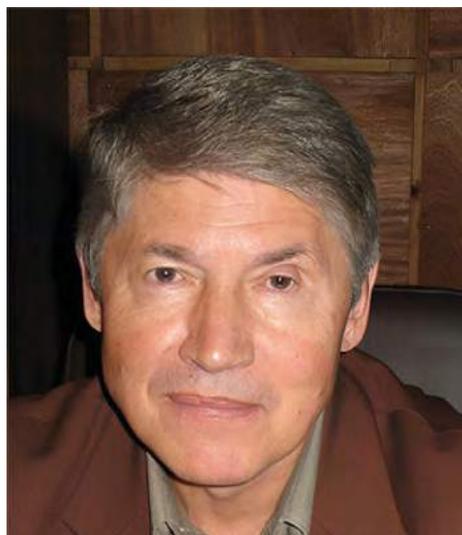


Рис. 1.6. Владислав Александрович Румянцев

С 1991 г. в Институте функционировал Специализированный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций. Председателем Совета был д.г.н. В.А.Румянцев, секретарем – к.б.н. М.В. Белова. За период до 2015 г. в Совете было защищено более пятидесяти кандидатских и докторских диссертаций по географическим, биологическим и физико-математическим наукам.

В первом десятилетии XXI века совместными усилиями сотрудников Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) разработана модель гидротермодинамики озера FLake (www.lakemodel.net) [Implementation of the lake..., 2010; Golosov, Kirillin, 2010]. Впоследствии модель была дополнена гидроэкологическим модулем и получила название FLakeEco [Physical background of oxygen..., 2007; Гидрофизические аспекты формирования..., 2010] и метеорологическими данными (FLake-Global) [FLake-Global: Online..., 2011] (см. главы 7 и 12).

Обобщение материалов наблюдений на озере Красном позволило осмыслить теоретические и методические проблемы лимнологического мониторинга озер [Методические аспекты лимнологического..., 1988]. Установлена четко выраженная детерминированность продукционных процессов в озере гидрометеорологическими факторами, в первую очередь, термическим воздействием. По данным многолетних наблюдений максимальная продуктивность биологических сообществ отмечалась в наиболее теплые годы маловодных периодов. Анализ соотношения влияния природных и антропогенных факторов на процесс эвтрофирования озера Красного показал, что на начальном этапе эвтрофирования антропогенные процессы во многом нивелируются климатическими факторами. Наиболее показательны на фоне медленного повышения продуктивности биологических сообществ существенные изменения в их структуре, в первую очередь, исчезновение реликтовых организмов. Как показали натурные исследования 1990-х гг., статус оз. Красного сохранялся мезотрофным, что связано с очевидным ослаблением антропогенного воздействия в начале 90-х гг. прошлого столетия. Однако, с конца 90-х гг. в связи с началом массового строительства по берегам озера и усилением рекреационной активности начался новый этап эвтрофирования. По данным 40-летних исследований (1964–2005) опубликована монография, где прослежены многолетние изменения гидрологического и гидрохимического режимов, а также состава и продуктивности биологических сообществ (фито-, зоо-, бактериопланктона, макрофитов, зообентоса) в оз. Красном, оценено влияние процесса эвтрофирования и гидрологических факторов, обусловленных климатическими флуктуациями, на межгодовую динамику биологических сообществ, динамику численности популяций массовых видов и трофические связи между сообществами [Многолетние изменения биологических..., 2008] (см. раздел 6.2).

В середине 1990-х годов прошлого века Институтом озераведения был предложен первый вариант федерального закона об охране природной среды Ладожского озера и его бассейна, проект которого одобрен решением Межрегионального координационного комитета Северо-Запада по рациональному природопользованию и охране окружающей среды в августе 1995 г., но законодательно принят не был. В последующие годы работы по совершенствованию концепции закона продолжались [Алхименко, Кудерский, Румянцев, Соболев, 2007]. Законопроект предусматривал, что субъекты РФ, на территории которых расположен природный комплекс Ладожского и Онежского озер, будут вправе принимать подзаконные правовые акты по вопросам переданных государственных полномочий, а также издавать обязательные для исполнения методические указания и инструктивные материалы по осуществлению переданных государственных полномочий. Тем не менее, закон не был принят, основной причиной этого, по-видимому, явилось ущемление интересов крупных промышленных и сельскохозяйственных компаний, осуществляющих сброс сточных вод в водные объекты бассейна Ладожского озера.

Начиная с 1990-х гг. прошлого века ИНОЗ активно работал над созданием новой технологии ликвидации последствий нефтяных загрязнений. Институтом была предпринята попытка объединить в одном препарате возможности сорбционной технологии и биологических методов. Полученный препарат, который вобрал в себя достижения обоих подходов, получил название биосорбента. Важнейшими при создании препарата были следующие основополагающие положения:

- использование штаммов микроорганизмов только природного происхождения, причем обязательно родственных экосистеме района применения;
- применение в качестве сорбентов только естественных экологически инертных носителей;
- учет физико-химических свойств разных типов нефтепродуктов.

Исходя из названных положений, было разработано несколько модификаций препарата «Биосорб» для работы в разных регионах и очистки от нефтепродуктов поверхности и водной толщи, прибрежных слоев и донных отложений. В 1992–2001 гг. Институт принимал участие в организованных на средства Евросоюза сравнительных испытаниях препаратов для ликвидации последствий нефтеразливов на возможность использования их в северных широтах, включая Арктический регион. На первом этапе 1992–1994 гг. испытания были направлены на проверку эффективности препаратов при очистке поверхности воды и водной толщи и включали три вида экспериментов: лабораторные, модельные и натурные. Первые два вида исследований осуществлялись на базе Государственного технологического центра Финляндии (VTT-center), а натурные работы проводились в Кольском заливе на базе Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ РАН). В экспериментах тестировались американский биосорбент «Пристон Си» компании «Марин систем», российский препарат «Биосорб А» и финский сорбент «Эколайф» компании «Ka biokasva Oу». Лабораторные эксперименты были направлены на выявление поведения нефти в воде и изменения ее свойств во времени под воздействием препаратов, а также на санитарно-токсикологический контроль как за отдельными штаммами микроорганизмов, входящих в состав биосорбента, так и за экологической безопасностью применения самих препаратов. Исследования проводились по специально созданной программе с использованием разработанных для этого методов и средств. Различные модификации препарата «Биосорб» были успешно использованы в более чем в 40 случаях ликвидации серьезных аварийных разливов нефтепродуктов, которые имели место на Ладоге, р. Неве, Финском заливе, Черном море. Основные положения биосорбционной технологии ликвидации нефтеразливов, результаты международных сравнительных испытаний, а также примеры практического применения препарата «Биосорб» приведены в монографии А.Б. Левченко и В.А. Румянцева [2010].

В начале 2000-х гг. ИНОЗ РАН вместе с Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова выиграли тендер, объявленный Администрацией Санкт-Петербурга на создание в рамках комплексного плана обнаружения и ликвидации аварийных нефтеразливов технологии непрерывного контроля за наличием нефтяных загрязнений на водной поверхности в черте города. Было решено в основу создаваемой технологии непрерывного контроля за нефтяными загрязнениями положить оптические методы и средства с передачей многомерной оптической информации по системе мобильной связи в центр управления по ликвидации аварийных разливов. Создан малогабаритный светодиодный регистратор нефтеразливов «Краб», включающий блоки излучателя, приемника и цифроаналогового преобразователя отраженного сигнала. Для размещения оптических средств было предложено воспользоваться градостроительной особенностью – наличием множества мостов через реки и каналы города. В 2004 г. была запущена в пробную эксплуатацию первая очередь круглосточной системы непрерывного контроля за разливами нефтепродуктов, которая включала в себя 4 моста: Литейный, Александра Невского, Володарский и Малоохтинский с установленными на них автоматизированными информационно-оптическими комплексами. С помощью комплекса определяется не конкретный тип обнаруживаемого нефтепродукта, а наличие пленок нефтепродуктов на водной поверхности и измеряются их концентрации в воде на основе физических и физико-химических методов анализа. В состав комплекса входят: дистанционные оптические регистраторы нефтяных пленок типа «Краб», автоматические анализаторы концентрации нефтепродуктов «Флюорат АЕ 2», инфракрасные видеокамеры и сотовые видеокамеры в защитных кожухах, система передачи данных по GSM-каналу. Одновременно на двух других мостах: Кантемировском и Большим Обуховским обрабатывались усовершенствованные средства обнаружения нефтяных пленок и передачи информации. В 2011 г. по заказу ГУП «Водоканал СПб» на Кузьминском железнодорожном мосту был установлен усовершенствованный комплекс обнаружения нефтяных загрязнений с исправлением некоторых выявленных ранее недостатков. Он входил частью в создаваемую Водоканалом систему обнаружения токсичных веществ и предназначался для предотвращения попадания нефтепродуктов в водозабор очистных сооружений г. Колпино [Румянцев, Кондратьев, 2022].

В 2000-х гг. Институтом озераедения был выполнен комплекс натурных исследований течений в акватории Невской губы, а также численные эксперименты с использованием трехмерной гидродинамической модели, направленные на оценку возможности разбавления сточных вод юго-западных очистных сооружений (ЮЗОС) за счет водных масс Центральной части Невской губы и глубоководных фарватеров [Оптимизация расположения водовыпусков..., 2007]. Совместно со специа-

листами СПб филиала Института океанологии РАН [Оценка изменения качества воды..., 2006] было показано, что манипулирование затворами водовыпускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в их окрестности (см. главу 12).

В ИНОЗ РАН было разработано несколько вариантов модернизации системы государственного мониторинга поверхностных вод применительно к конкретным задачам рационального использования и охраны водных объектов. Первый из них выполнен по заказу Комитета по природопользованию и охране окружающей среды администрации Санкт-Петербурга в 2002 г. для контроля за обеспечением экологической безопасности на водоемах урбанизированных территорий. Система получила название ранней диагностики кризисных экологических ситуаций и, кроме урбанизированных водоемов, она полностью подходит для малых и средних озер, используемых в рекреационных и хозяйственно-бытовых целях. В основу системы ранней диагностики кризисных экологических ситуаций положено небольшое число показателей, дающих интегральное представление о развитии в водоеме негативных процессов эвтрофирования, закисления, загрязнения, токсификации. Определение этого комплекса показателей позволяет достаточно адекватно оценить качество воды и состояние водоема в целом. В рамках данной системы разработана методика измерения, включающая научно обоснованное предписание периодичности обследования водоемов, необходимого числа отобранных для анализа проб, месторасположения станций отбора проб, а также рекомендуемые методики аналитического определения контролируемых показателей. Оценка экологической ситуации на водоеме дается в соответствии с разработанной системой критериев, где для каждого из контролируемых показателей определен диапазон значений, соответствующих «относительно удовлетворительной», «напряженной» или «кризисной» ситуации. Основным достоинством разработанной системы является то, что при резком сокращении материальных и трудовых затрат, по сравнению с Федеральной системой мониторинга, она обеспечивает возможность оперативной оценки экологического состояния большого числа водоемов и выявления негативных процессов на ранней стадии их развития. В большинстве случаев полученный объем информации является достаточным для своевременного принятия соответствующими городскими структурами превентивных адекватных мер, направленных на оздоровление экологической ситуации [Румянцев, Игнатъева, 2006] (см. раздел 6.3).

Последние три десятилетия характеризуются активным трехсторонним сотрудничеством между Финляндией, Эстонией и Россией в изучении и оздоровлении Финского залива. ИНОЗ РАН принимал активное участие в международных проектах, направленных на решение экологических проблем водной системы Ладога – р. Нева – Восточная часть Финского залива. Наиболее важными и масштабными мероприятиями явились проекты «Год Финского залива – 96» и «Год Финского залива – 2014». В первом проекте с Российской стороны участвовали 12 организаций, координация научных исследований осуществлялась Институтом озераедения РАН. По результатам работ сформирована «Программа мер по сокращению загрязнения водных объектов и осуществлению водоохранных мероприятий в бассейне Балтийского моря», в которой были определены основные предприятия-загрязнители и намечены пути необходимой модернизации их очистных сооружений, а также строительство водохранилищ. Программа мер была обсуждена и одобрена на совещании министров по охране окружающей среды трех стран с участием представителей общественности и потенциальных инвесторов. Положения программы мер составили основу дальнейших действий трех стран, направленных на изучение, охрану, оздоровление и рациональное использование ресурсов Финского залива в последующие годы. Результаты исследований российских специалистов, выполненные в рамках проекта, представлены в монографии «Финский залив в условиях антропогенного воздействия» [1999].

Проект «Год Финского залива – 2014» объединил ученых, представителей государственных структур и общественности Финляндии, Эстонии и России с целью воздействия выполнения странами региона норм национального и международного законодательства, международных природоохранных конвенций, а также проведения научных исследований по всем ключевым темам для обеспечения защиты Финского залива и устойчивого развития региона сегодня и в будущем [The Gulf of Finland Assessment, 2016]. В рамках проекта ИНОЗ РАН проводил работы, связанные с оценкой биогенной нагрузки на Финский залив с Российской водосборной территории и проверкой ее соответствия международным требованиям. Указанным работам предшествовало подписание в 2007 г. всеми странами Балтийского региона на сессии Хельсинской комиссии (ХЕЛКОМ) так называемого

Плана действий по Балтийскому морю (ПДБМ), который должен представлять собой долговременную стратегию оздоровления Балтийского моря. Одно из важнейших направлений ПДБМ – разработка мероприятий по снижению поступления в морскую экосистему общего фосфора и общего азота, приводящих к нежелательному эвтрофированию. ПДБМ предполагает установление в будущем платы за избыточное поступление биогенных веществ в Балтийском море от каждой страны, что придает особую актуальность вопросу о выполнении научно обоснованной оценки современного уровня биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России.

В 2015 г. директором ИНОЗ РАН был избран д.г.н. Шамиль Рауфович Поздняков (рис. 1.7). Под его руководством выполнялось несколько НИР Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», раздел «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации». В этот период под руководством Ш.Р. Позднякова Институт выполнял такие работы как: «Исследование и расчет биогенной нагрузки, поступающей с территории Российской Федерации, на Балтийское море», «Разработка рекомендаций и мероприятий по уменьшению влияния диффузного загрязнения на трофическое состояние Чудско-Псковского озера», «Совершенствование мониторинга состояния экосистемы и качества вод Ладожского озера и р. Невы», «Оценка современного состояния и прогноз тенденций изменения экосистемы Ладожского озера и р. Невы», «Оценка состояния трансграничных водных объектов – озёр Синьша и Платично бассейна реки Западная Двина на территории Псковской области и разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по улучшению качества вод», «Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно обоснованных предложений по её снижению», «Научно обоснованные предложения по установлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)», «Научно обоснованные предложения по распределению величины трансграничной нагрузки с территории Калининградской области на юго-восточную часть Балтийского моря между Российской Федерацией и сопредельными государствами – Литва, Польша, Белоруссия» и др. Институт участвовал в выполнении проекта «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол

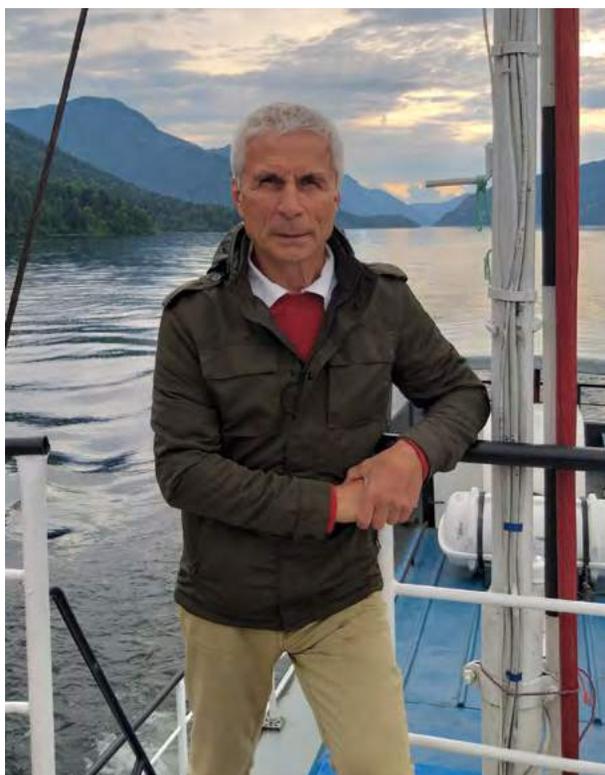


Рис. 1.7. Шамиль Рауфович Поздняков

от 30.08.2017 N 9), а также крупных международных проектов SEVIRA и EnviTox (см. главу 11).

Основное место в работах Института последние десятилетия занимали исследования Ладожского озера (рис. 1.8) – уникального природного объекта, со времен последнего оледенения, сохранившего представителей флоры и фауны (см. главы 3, 4 и 5). Озеро имеет большое геостратегическое значение как крупнейший пресноводный водоем Европы и оказывает серьезное влияние на экологическое состояние и качество воды Финского залива и Балтийского моря, а также играет огромную роль в водоснабжении Санкт-Петербурга и ряда городов и населенных пунктов Ленобласти и в Республике Карелия. В небольшой статье невозможно с достаточной степенью понимания изложить основные результаты многоплановых междисциплинарных исследований Ладожского озера и водных объектов его бассейна, тем более что многие результаты представлены в работах [Ладога, 2013; Ладожское озеро – критерии состояния..., 1992; Ладожское озеро – прошлое, настоящее..., 2002; Ладожское озеро и достопримечательности..., 2015], а также в последней обобщающей кол-

лективной монографии «Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата» [2021]. В этой монографии рассмотрен ряд важных фундаментальных и прикладных задач по оценке антропогенной трансформации экосистемы Ладожского оз. в условиях изменяющегося климата, существенно расширяющих имеющиеся представления о функционировании и развитии самого озера и его водосборной территории. Выявлены изменения термического режима Ладоги, связанные с климатическими изменениями. Дана оценка воздействия водосбора на состояние озерной экосистемы. Создана геоморфологическая карта, на которой отражены особенности строения дна озера. Гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические исследования позволили оценить современное состояние озера и его притоков. Выявлены зоны экологического риска на акватории и водосборной территории, требующие регулярного мониторинга для предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с возможным неконтролируемым негативным воздействием этих зон на весь водоем. На акватории озера и его притоках проведены исследования по оценке загрязнения микропластиком. Сформулированы принципы и основные направления совершенствования мониторинга Ладожского озера. Достигнуты значительные успехи в создании и практическом применении моделей термо-гидродинамических процессов и экосистемы Ладожского озера.



Рис. 1.8. Экспедиционные работы на Ладоге

Подготовлена и опубликована монография «Литоральная зона Ладожского озера» [2011], в которой представлены морфометрические, гидрологические и гидрохимические характеристики литоральной зоны Ладоги. Описана высшая водная растительность озера и особенности ее пространственного распределения. Представлены качественные и количественные оценки развития в литоральной зоне фитопланктона, перифитона, зоопланктона, макрофауны, мейобентоса. Проанализированы факторы, влияющие на состав и количественное развитие биологических сообществ. Большое внимание уделено экологии, биологии и роли видов-вселенцев в литоральной зоне озера.

Показано, что на современном этапе биоинвазии являются существенным фактором трансформации экосистемы Ладоги.

На основе данных натурных измерений показано, что осадконакопление на дне Ладожского озера имеет четко проявленный асимметричный характер. В северной части озера отмечается преобладание зон аккумуляции, а в южной господствуют условия подводного размыва или «нулевой седиментации», что связано с особенностями геологического строения, рельефом дна и особенностями палеогеографического развития Ладоги. Поверхностные отложения Ладожского озера представлены всеми основными гранулометрическими типами от валунов до коллоидных частиц, распределение которых определяется особенностями рельефа Ладожской котловины и характером гидродинамических процессов. Крупность донных отложений уменьшается по мере продвижения к центру водоема, при этом содержание частиц мельче 1000 нм в зонах аккумуляции мельчайших донных отложений может достигать до 30 % от общего состава. Концентрация химических компонентов в донных отложениях возрастает по мере уменьшения размера частиц осадков от песков к алевроитам и глинам. Исключения составляют локальные зоны, находящиеся под прямым воздействием промышленных стоков [Ладога, 2013].

Исследования 22 притоков Ладожского озера и оценка их состояния по гидрохимии и фитопланктону позволили дать характеристику изменений гидрохимических показателей рек бассейна Ладоги, оценить их экологическое состояние и качество вод, а также выявить основные факторы, определяющие формирование их трофического состояния [Trifonova, Pavlova, Rusanov, 2007].

В начале 2000-х гг. группа палеолимнологии первой для европейской территории России использовала метод тифрохронологии в изучении истории озер. Разработана методика разделения влияния антропогенных и природных факторов на экосистему озер по палеолимнологическим данным, которая постоянно совершенствуется. В настоящее время разрабатывается новый подход к изучению изменения уровня озер и морей с использованием макроостатков и пыльцы макрофитов для реконструкции этапов изоляции озер от более крупных водоемов (озер, морей). Развиваются старые методы на новом уровне. Так, при палинологическом анализе помимо пыльцы изучаются непыльцевые палиноморфы. Параллельно с диатомовым анализом изучаются цисты золотистых водорослей. Планируется продолжение работ по количественным реконструкциям палеоклимата (см. главу 8).

В последнее десятилетие сформирована и успешно используется детерминированно-стохастическая модельная система ИНОЗ РАН, ориентированная на количественную оценку процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем», а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений. Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. В состав модельной системы входят следующие компоненты: модель формирования стока на водосборе, модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект, модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D), 1D- модель теплового режима и перемешивания водоема, 1D- модель динамики неконсервативной примеси в водоеме FLakeEco, 2D- модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме, 3D- модель тепло- и массопереноса в водоеме, стохастическая модель погоды [Кондратьев, Шмакова, Голосов, Зверев, 2021] (см. главу 12).

С 2000-х гг. в ИНОЗ проводятся исследования современного состояния, причин и тенденций изменения озер России и мира. При их проведении кроме количественной оценки озерного фонда страны и ее отдельных физико-географических и административных регионов, было установлено качество составляющих его озерных вод, выявлены особенности функционирования водных экосистем, расположенных в разных природных условиях, вскрыты основные закономерности реакции озерных экосистем на антропогенную нагрузку в зависимости от происхождения, а также выделены предпринятые природоохранные меры, которые в последние десятилетия наилучшим образом способствовали восстановлению озер. (см. главу 2).

Специалисты ИНОЗ работают над созданием комбинированного метода регуляции «цветения» пресноводных водоемов и уже более 10 лет занимаются исследованием возможности ультразвукового излучения как средства решения проблемы минимизации негативных последствий «цветения» (см. главу 10). Центральное место в работах занимают экспериментальные исследования, которые

проводятся в лабораторных условиях как с отдельными видами цианобактерий, так и в природных непосредственно на водоемах. В обоих случаях используются специально разработанные для этой цели методики и оборудование. В частности, учитывая большое многообразие условий работы на водоемах в силу различия их морфометрических характеристик, доминирующих видов цианобактерий, возможностей обеспечения безопасности и сохранности оборудования и т.п., были разработаны и опробованы различные типы ультразвуковых установок: с подключением к электросети, использованием аккумуляторов и солнечных батарей, с размещением ультразвуковых установок на поверхности и под водой, однонаправленным и круговым облучением, с постоянной и переменной частотой [Румянцев, Крюков, Рыбакин, Киселев, 2015; Румянцев, Рыбакин, 2019; Румянцев, Рыбакин, Рудский, Коровин, 2021].

В настоящей главе упомянуты далеко не все научные исследования, выполненные за последние годы в Институте озераведения. В качестве примера ниже приведен перечень результатов фундаментальных научных исследований ИНОЗ РАН только за 2020 г., первую половину которого Институт еще был самостоятельной научной организацией (ФГБУН). Сведения приводятся на основании справки о деятельности Института по Программам фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., представленной Академику-секретарю Отделения наук о Земле РАН (Приложение к письму № 060/04-01-62 от 25.12.2020).

- *Получены данные по компонентному составу низкомолекулярных метаболитов макрофитов в Ладожском и Онежском озерах, которые послужат отправной точкой контроля стабильности озерной среды в этих водоемах на основе инновационного интегрального метода оценки стабильности водных экосистем по низкомолекулярному метаболиту (НМ) водных растений. На примере рдеста гребенчатого выявлен механизм биохимической и экологической адаптации инвазивных видов макрофитов к новым условиям путем синтеза совокупности метаболитов, обеспечивающих способность вида осваивать новые местообитания. Данные по компонентному составу НМ исследованных макрофитов дополнили формируемую базу низкомолекулярных метаболитов водных растений.*

- *Установлена связь между слабым ультразвуковым воздействием и состоянием стенок клеток цианобактерий. Экспериментально обнаружено увеличение толщины стенок клеток и обволакивающей их слизи, зависящее от величины слабого акустического поля и его частоты, что замедляет скорость обмена среда-клетка и не позволяет цианобактериям нормально расти и развиваться. Это подтверждается с помощью метода биоиндикации на дафниях. Обработка клеток цианобактерий слабым ультразвуковым полем через неделю блокирует выделение клетками токсинов, и вода перестает быть токсичной. Во время испытаний, разработанных принципиально новых ультразвуковых устройств, в воде двух водоемов удалось снизить концентрации фитопланктона и микофлоры. Подана заявка на патент на полезную модель «Скрытно устанавливаемое автономное ультразвуковое устройство для предотвращения «цветения» воды».*

- *Совместно с Университетом ИТМО изучено бактерицидное действие разработанных в ИНОЗ РАН препаратов на основе озерного сапропеля. Экспериментально доказано выраженное бактерицидное и бактериостатическое действие ультрадисперсных гумато-сапропелевых суспензий на микрофлору зерновых культур при их хранении. Сделан вывод, что указанные суспензии могут быть использованы для разработки технологий хранения зерна, обеспечивающей длительное «консервирование» и предотвращение развития бактериальной микрофлоры.*

- *На основе разработанной методики проведена оценка водных ресурсов озер Европы. В озерах заключено ~ 3290 км³ воды, из них ~ 41 % – на северо-западе европейской части России. В озерах Альп и предальпийского пояса заключено ~344 км³ воды. В озерах, расположенных на территориях последнего четвертичного покровного оледенения, сосредоточено ~2790 км³ воды, из них 48 % приходится на российскую часть, 45 % – на Скандинавию, 4 % – на острова Атлантического океана, менее 3 % – на Балтийский регион. Суммарный запас озерных вод в 6,5 раз превышает запас водохранилищ. Полученные результаты позволяют сравнить водообеспеченность российской и зарубежной территорий и определить место, которое озерный фонд России занимает в водных ресурсах Европы.*

- *С использованием облачного программного продукта для исследования геопространственных данных Google Earth Engine сделан анализ коллекций спутниковых снимков Landsat,*

Sentinel и *MODIS*. Использование алгоритмов коррекции спутниковых фотографий от облачности позволило получить непрерывный хронологический ряд снимков одного озера, доступный для дальнейшего временного анализа. Разработаны программы для расчета площади поверхности и периметра озера, позволяющие вычислять ее на основе растрового изображения, без перевода в векторную маску.

- Проанализировано изменение водных ресурсов, водопотребления и экологического состояния рек и озер за период, прошедший с 1990 года, когда в России отмечалась максимальная нагрузка на водные экосистемы. Выявлено снижение показателей водопотребления, напряженности водохозяйственного баланса, увеличение кратности разбавления сточных вод для большинства федеральных округов, улучшение качества воды ряда крупнейших рек и озер, и, в то же время – широкомасштабное ухудшение экологического состояния водных экосистем арктической зоны РФ. Обосновано, что на фоне низкой изученности водных экосистем Арктики, ее дальнейшее освоение и наблюдающееся потепление климата могут привести к возрастающему загрязнению пресноводных водоемов и водотоков токсическими веществами, патогенными микроорганизмами и вирусами, что обострит вопрос удовлетворения потребностей населения в качественной питьевой воде.

- При помощи созданного в ИНОЗ РАН подводного аппарата выявлены инвазия и натурализация в Ладожском озере моллюска *Dreissena polyzona* (Pallas, 1771). Показано, что в настоящее время популяция дрейссены развита слабо, не составляет конкуренции аборигенным видам и не оказывает существенного влияния на структуру и функционирование бентоса в целом. В то же время, обнаруженная способность адаптации дрейссены к низко минерализованной воде Ладоги в условиях изменяющегося климата не исключает дальнейшего распространения вида в водоеме и значительной трансформации бентосных биоценозов подобно тому, как это произошло в Великих американских озерах, где вселение дрейссены привело к значительным структурным перестройкам их экосистем.

- На основе изучения сезонной динамики гидрохимических и гидробиологических показателей в рамках комплексных сравнительно-лимнологических исследований впервые оценено экологическое состояние двух озерно-речных систем Карельского перешейка, принадлежащих водосбору Ладожского озера. Установлено, что сведение лесов, торфоразработки и другие виды антропогенного вмешательства, способствующие усилению поступления гуминовых веществ с водосборов, ведут к тому, что возросшая антропогенная нагрузка превышает возможности изученных экосистем к самоочищению. Показано, что основными источниками загрязнения обеих систем являются хозяйственно-бытовые и сельскохозяйственные стоки. При этом большая часть поступающих с водосборов аллохтонных веществ следует транзитом, не трансформируясь, по рекам юго-западного побережья и поступает в Ладожское озеро.

- На основе многолетних исследований изменчивости основных компонентов экосистемы мезотрофного оз. Красного (водосбор р. Вуоксы и Ладожского озера) подтверждена установленная ранее стимулирующая роль температуры в развитии процесса эвтрофирования. В условиях существенного снижения уровня воды в летний период выявлено наибольшее за последние годы развитие в озере потенциально токсичных цианобактерий. Показано, что массовая вегетация индикаторных видов *Cyanoobacteria*, вызывающая «цветение» воды, связана с ухудшением экологического состояния озера в результате эвтрофирования и под воздействием климатических флуктуаций.

- Разработаны методические подходы для выделения верхнего квазиоднородного слоя, слоя скачка и его эволюции в Ладожском озере на основе вертикальных профилей температуры и плотности воды. Получены эмпирические зависимости, позволяющие определить различные параметры слоя скачка в период открытой воды, установлены корреляционные связи между температурой поверхности воды и глубиной слоя скачка.

- Комплексный палеолимнологический анализ донных отложений Ладожского озера и малых озер позволил получить новые данные влияния природных и антропогенных факторов на озерные экосистемы. Впервые для оценки возраста наряду с применением палиностратиграфии для непрерывной последовательности донных отложений центральной части Ладожского озера, накапливающихся в течение голоценового периода, получена серия радиоуглеродных дат (AMS). Установлено, что в течение голоцена скорость седиментации была разной; самая низкая скорость осадения была рассчитана для современного периода. Выявлены периоды снижения продуктивности экосистемы Ладоги около 1700 лет назад в результате похолодания. Получены новые результаты

оценки динамики антропогенной и климатической составляющих в голоцене на основании палео-лимнологических данных малого озера на Карельском перешейке.

- Создана серия из 3-х подводных аппаратов, с помощью которых проведен ряд уникальных исследований донных осадков и подводных ландшафтов северной части Ладожского озера и построены крупномасштабные карты донных отложений в ряде районов Ладоги. Проведено моделирование донного рельефа и составлены предварительные тектонофизические схемы районов Ладожского озера.

- Выполнено усовершенствование модели биогенной нагрузки на озеро с целью учета внутригодовой динамики выноса азота и фосфора с водосборной территории. Модель использована для расчетов внутригодовой динамики выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий, расположенных на водосборах рек (Карельский перешеек).

- Создана и зарегистрирована «База данных по расходу наносов рек Северо-Запада РФ» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621833 от 22.10.2019). С использованием созданной базы впервые рассчитаны значения расхода наносов для периодов различной водности ряда притоков Ладожского озера.

- По результатам 3D- моделирования выполнены оценки возможных изменений термического и ледового режимов Ладожского озера. Показано, что при реализации климатического сценария MPI_B2 процессы вскрытия озера, прохождения термобара и летнего прогрева водной массы будут проходить на 3–4 недели раньше по сравнению с текущим состоянием.

- Выполнены исследования по обоснованию влияния астрономических факторов на формирование циклов временной изменчивости температуры воздуха, как основного образующего фактора температурного режима воды озер. Изучены закономерности межгодовых колебаний гидрологических процессов по их среднегодовым рядам.

- Впервые разработана методика оценки гранулометрического состава наносов в субмикронном (наномасштабном) размерном диапазоне, позволяющая в сочетании со стандартными методами выполнять измерения во всем диапазоне размеров частиц, характерных для естественных водных объектов.

- Проведены работы по разработке методики оценки частиц микропластика, а также других частиц субмикронных диапазонов размеров во внутриконтинентальных водоемах и водотоках. Существующие российские и зарубежные методики адаптированы к условиям пресноводных объектов – содержанию большого количества взвеси и гумусового вещества в водной толще и донных осадках, а также гранулометрическим характеристикам донных отложений и речных наносов. Впервые получены данные о содержании частиц микропластика на акватории Ладожского озера, его водосборе, а также в Невской губе Финского залива. Проанализирована концентрация микропластика в различных средах водных экосистем – водной толще, прибрежных грунтах и донных отложениях. В результате выявлены преобладающие формы частиц, их размерный диапазон, химический состав некоторых полимеров и их количественное содержание.

В мае 2020 г. по решению Министерства науки и высшего образования ФГБУН Институт озераведения Российской академии наук прекратил свое существование как юридическое лицо. Он был введен в состав СПб ФИЦ РАН в качестве обособленного структурного подразделения. Фактически Институт вернулся в исходное состояние Лаборатории озераведения, но с гораздо меньшими, чем в 1944 г., правами. Результатом реорганизации к настоящему времени явилось почти двукратное сокращение численности сотрудников. Уменьшилось количество реализуемых направлений научных фундаментальных исследований. Многократно сократились внебюджетные работы. В последующих главах настоящей монографии представлено более подробное описание тех направлений научных исследований, которые сохраняются в настоящее время в ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН.

Глава 2

ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕРНОГО ФОНДА И ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА НАЦИОНАЛЬНОМ, КОНТИНЕНТАЛЬНОМ И ГЛОБАЛЬНОМ УРОВНЕ

Количественные оценки озерного фонда на национальном и глобальном уровне волнуют научное сообщество уже на протяжении нескольких столетий. В России инвентаризационные работы, учитывающие наиболее крупные водоемы, проводились уже в XVII в. Первой гидрографической работой, содержащей ряд сведений как по крупным рекам, так и по 62 озёрам государства Московского, явилась составленная в 1627 г. «Книга по Большому чертежу», опубликованная под названием «Древняя Российская гидрография, содержащая описание Московского государства рек, протоков, озёр, кладезей и какие по ним города и урочища и на каком оные расстоянии» [1773]. По мере организации крупнейших географических экспедиций XVIII–XX вв., сведения об озерном фонде постепенно уточнялись.

Создание к началу 1940-х годов карт масштаба 1:1 000 000, покрывающих всю европейскую территорию СССР, и карт масштаба 1:2 500 000, покрывающих ее азиатскую территорию, позволили предпринять первую попытку исчисления озер на общегосударственном уровне без привлечения дополнительных экспедиционных исследований. Всего было насчитано 70 988 озёр, при этом не были учтены малые водоёмы и озёра малоисследованных регионов. В 1960-х гг. управлениями Гидрометслужбы под руководством Гидрологического института (ГГИ) была проведена крупнейшая работа по инвентаризации озёр всей территории Советского Союза на основе вышедших к этому времени крупномасштабных карт. В пределах Советского Союза было насчитано 2 854 166 озёр суммарной площадью водной поверхности (без Каспия и Арала) – 488 440 км² [Доманицкий, Дубровина, Исаева, 1971].

Со второй половины XX века появилась возможность исчисления озерного фонда используя, в том числе, дистанционные методы изучения Земли. Значительное развитие к этому периоду статистических методов в географических исследованиях и возможность использования спутниковой информации привели к активизации работ, направленных на оценку как суммарного количества озер Земли, так и запасов содержащихся в них вод [Nase, 1969; Львович, 1974; Tamrazyan, 1974; Wetzel, 1983; Meybeck, 1995; World Water Resources..., 2003; Рянжин, 2005a]. Однако получаемые разными авторами оценки (табл. 2.1) сильно различались между собой.

Табл. 2.1. Оценки суммарных запасов вод Земли

Источник	Объем воды, содержащейся во всех озерах Земли, км ³	Объем пресных озерных вод, км ³	Объем минерализованных озерных вод, км ³
[Nase, 1969]	230 000		
[Львович, 1974]	275 000		
[Tamrazyan, 1974]	166 000		
[Wetzel, 1983]	229 000	125 000	104 000
[Meybeck, 1995]	179 000		
[World Water Resources..., 2003]	176 400	91 000	85 400
[Рянжин, 2005a]	179 600		

В Институте озераведения РАН, начиная с 1990-х гг., исследования, направленные на систематизацию сведений об озерах Земли, оценку их общего количества и их водных ресурсов, возглавил доктор географических наук Сергей Валентинович Рянжин (рис. 2.1). С этой целью под его руководством была разработана и создана база данных (БД) по озерам мира WORLDLAKE [Рянжин, Улья-

нова, 2000; Свидетельство о государственной..., 2015], содержащая их разнородные количественные характеристики (морфометрические, термические, гидрохимические, гидробиологические) и составленная на основе многочисленных литературных источников и национальных каталогов данных. На сегодняшний день БД включает данные по более чем 60 тыс. озерам мира, из них около 11 тыс. – на территории России. В 2019–2022 гг., уже после смерти С.В. Рянжина, база WORLDLAKE была существенно доработана – пересмотрены данные о генетическом происхождении озёрных котловин, добавлена информация о принадлежности озёрной экосистемы к особо охраняемым природным территориям (ООПТ).



Рис. 2.1. Сергей Валентинович Рянжин (1953–2013)

На основе собранной базы данных WORLDLAKE были получены зависимости между различными характеристиками озерных котловин, выявлены закономерности изменения морфометрических и термических характеристик озер, расположенных в различных регионах мира. Определены тенденции изменения различных параметров, характеризующих озерные экосистемы, под воздействием климатических факторов [Рянжин 2005а; 2005б]. Впервые получены статистические степенные распределения площадей озер, расположенных в различных природных регионах мира, и интегральные статистические степенные распределения объемов озерных котловин [Ryanzhin, 2005]. На основе разработанных геостатистических зависимостей в 2000-х гг. была проведена оценка запасов воды в озерах мира.

Впоследствии геостатистический метод исследования объема водных ресурсов озер мира был расширен С.В. Рянжиным и его учениками на водоемы различного происхождения на территории России [Ахмедова, Рянжин, 2009; Coastal lakes of..., 2011]. С помощью полученных геостатистических зависимостей первоначально рассчитано, что число озер России с площадью больше 1 га составляет 1,58 млн, их суммарная площадь равна 341 600 км² (или 264 000 км² без учета Каспийского моря), а суммарный запас воды – 24 996 км³ (без Каспийского моря) и 2 001 тыс. км³ (без учета Каспийского моря и озера Байкал). Однако, эти оценки площади и объема озер оказались ниже, чем данные, приведенные во втором издании Водного кадастра, основанные на инвентаризации, проведенной в 1960–1970 гг. под руководством ГГИ, а также ниже, чем оценки, опубликованные в Национальном атласе России [Национальный атлас России ..., 2004]. В указанных работах приводятся суммарная площадь озер РФ 409 000 км² и суммарный запас вод примерно 26 тыс. км³. К сожалению, С.В. Рянжин, который работал над уточнением оценки водных ресурсов Российской Федерации [Кочков, Рянжин, 2016], внезапно скончался, не завершив исследования. Таким образом, вопрос создания единой методики оценки объемов водных ресурсов озер России и мира остался открыт, так же, как и вопрос о количестве озер на Земле.

Наряду с работами группы С.В. Рянжина, в ИНОЗ РАН с середины 2000-х гг. академиком, доктором географических наук Владиславом Александровичем Румянцевым были инициированы исследования, направленные на обобщение накопленной многоплановой информации по озерам России и мира. По их итогам небольшим коллективом, включающим также ведущего гидробиолога ИНОЗ РАН, доктора биологических наук Валентину Гавриловну Драбкову и доктора географических наук Анну Владиленовну Измайлову, было решено выпустить серию монографий об озерах различных регионов: их происхождении, распределении по территории, особенностям функционирования озерных экосистем и реакции на антропогенную нагрузку. Написанию серии предшествовал предварительный этап сбора разноплановой информации по озерам, которая в дальнейшем была собрана в несколько баз данных «Озера мира» и «Озера России». БД начали создаваться в рамках проекта Президиума РАН «Электронная Земля: научные информационные ресурсы и информационно-коммуникационные технологии» (2004–2008). Разработкой указанных БД, наряду с А.В. Измайловой, занимались Александр Иванович Моисеенков и Татьяна Юрьевна Ульянова. В отличие от базы WORLDLAKE, БД «Озера мира» и «Озера России» наряду с формализованной информацией, хранящейся в табличном виде, содержит большое количество неформализованной информации, организованной в виде html-файлов, содержащих текстовую и графическую информацию. Значительный акцент указанных БД был сделан на процессах, происходящих с озерными экосистемами под воздействием антропогенных факторов [Румянцев, Измайлова, Ульянова, 2009; Измайлова, Ульянова, 2014].

Обобщение собранной по озерам мира информации было начато в 2009 г. в рамках темы НИР ИНОЗ РАН «Выявление географических закономерностей в формировании озерных экосистем с использованием возможностей информационных систем» (2009–2012). В рамках темы были выявлены закономерности формирования крупнейших озер Земли, оценен их ресурсный потенциал [Румянцев, Драбкова, Измайлова, 2011; 2014; Izmailova, Rumyantsev, 2016], определены связи между основными внешними факторами, воздействующими на озеро и характеризующими водосбор, и формированием гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режима озера. Анализировалась реакция озерных экосистем, в зависимости от определяющих их природных особенностей, на хозяйственную деятельность на водосборе. По итогам работы над темой в 2012 г. была выпущена первая монография серии В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова «Великие озера мира» [2012]. В монографии подробно анализируются экосистемы 50 крупнейших озер мира, выделенных благодаря их значительным размерам, уникальности, социально-экономическому, рекреационному и эстетическому значению. В рассматриваемых озерах сосредоточены наибольшие запасы воды – более 70 % мировых запасов озерных пресных вод и более 80 % – солоноватых. Оценены природные факторы формирования экосистем этих озер, а также уровень антропогенного воздействия на водоемы и их водосборные бассейны. На основе обобщения имеющихся материалов была решена основная задача – определить запасы озерной воды в мире, характеризующейся высоким качеством, а также выделить озера, где загрязнение и процессы эвтрофирования достигли значительных масштабов. Особое внимание уделялось и водоемам, качество воды которых, благодаря успешно проведенным восстановительным мероприятиям, удалось в последние десятилетия улучшить. Другой важной задачей являлось выявление причин гибели некоторых крупных озер, и установление масштаба антропогенного воздействия, превышающего предел устойчивости озерных экосистем.

Работа над обобщающими монографиями по озерам различных регионов Земли вновь поставила вопрос о необходимости четкого представления о количественных характеристиках озерного фонда. С этой целью в рамках тем Программ Президиума РАН № 31 «Роль пространства в модернизации России: природный и социально-экономический потенциал» (2012–2014), и № 13 «Пространственное развитие России в XXI веке: природа, общество и их взаимодействие» (2015–2017) А.В. Измайловой были инициированы исследования по разработке методических подходов, на основе которых была проведена оценка водных ресурсов озер Российской Федерации и выполнено исследование закономерностей распределения озерного фонда по территории страны [Измайлова, 2016а; 2016б; 2018б]. В отличие от более ранних работ С.В. Рянжина, в этих исследованиях были задействованы открывшиеся в последние десятилетия возможности современной электронной

картографии. Наряду с А.В. Измайловой, работой со спутниковой информацией занималась Наталья Юрьевна Корнеенкова.

В основу новой оценки водных ресурсов естественных и искусственных водоёмов была положена детальная оценка площадей их водной поверхности, снятых с современных спутниковых снимков. Расчёт площадей водоёмов проводился на уровне озёрных регионов (с целью оценки географической детерминированности неравномерности распределения озёрного фонда) и субъектов Федерации (для оценки фонда естественных и искусственных водоёмов административных образований) с дальнейшим суммированием полученных величин при переходе на уровень Федеральных округов и страны в целом. На следующем этапе, на основе полученных площадей конкретных озёр, расположенных внутри определённого региона, суммарных площадей водной поверхности региона и данных по глубинам водоёмов, происходил переход от площадных к объёмным характеристикам водного фонда.

Оценка площади зеркала водоёмов включала в себя полный учёт всех водных объектов, площади которых превышали 1 км² (или 0,2 (0,5) км² – в случае низкой озёрности конкретного региона и значительном вкладе малых водоёмов в общую величину его водных ресурсов), тогда как суммарная поверхность водоёмов меньшей площади из-за их огромной численности оценивалась с помощью метода «выборочных квадратов» [Измайлова, 2018а]. Суть метода в том, что характеристики, полученные при детальной оценке площади водной поверхности в «выборочных квадратах», принимаются в качестве репрезентативных аналогов и переносятся на остальную часть исследуемой территории. При этом принимается гипотеза о нормальном распределении характеристик малых водоёмов по территории.

При переходе от полученных с использованием снимков площадных характеристик озёрных ресурсов к объёмам воды проводилось последовательное суммирование объёмов крупных, средних и малых морфометрически изученных водоёмов со слабо изученными в лимнологическом отношении озерами, для которых нет данных по их глубинам. При оценке их суммарного объёма использовались осредненные для территории глубины водоёмов, полученные на основе разработанных зависимостей между различными морфометрическими параметрами озёрных котловин. При осреднении учитывалась степень однородности территории, ее орографические особенности, происхождение озёрных котловин и принадлежность водоёмов к той или иной категории крупности.

Вся проведённая работа по оценке площадей водной поверхности регионов России была основана на визуально-инструментальном дешифрировании водных объектов, что позволило вычленив большую часть водоёмов искусственного происхождения, и прежде всего те из них, которые имеют чёткие границы на линии подпора, а также определить значительную часть водоёмов с высокой минерализацией.

В 2013–2018 гг. работы над обобщающими монографиями по озерам были продолжены в рамках темы НИР ИНОЗ РАН «Закономерности распределения озёрных ресурсов Российской Федерации». По итогам исследований по указанной теме, а также по результатам ресурсных оценок по темам Программ Президиума РАН были выпущены три монографии: В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова «Озёра европейской части России» [2015], Озёра азиатской части России» [2017], А.В. Измайлова «Озёра России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал» [2018а] (рис. 2.2). Первые две монографии посвящены проблемам изучения озёр европейской и азиатской частей России, их происхождению, распределению по территории, особенностям функционирования озёрных экосистем и их реакции на антропогенную нагрузку. Монографии являются обобщением накопленной многоплановой лимнологической информации по озерам России, в том числе за период наиболее активного антропогенного влияния на водные экосистемы. Работы основаны на актуальных данных, полученных с использованием современных геоинформационных систем, спутниковой информации, собственных материалах ИНОЗ РАН и многочисленных научных публикациях лимнологов из других институтов. Описание лимнологической изученности, особенностей функционирования озёрных экосистем и их реакции на антропогенную нагрузку приведено по 25 озёрным районам, выделенным на основе генетического принципа – примерного одновозрастного происхождения большинства озёрных котловин в пределах определенной территории.



Рис. 2.2. Монографии: Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. «Озера европейской части России» (а), Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. «Озера азиатской части России» (б), Измайлова А.В. «Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал» (в)

В монографии по озерам Европейской части России (ЕЧР) приводятся современные сведения о количестве, площади озера и их водных ресурсах, показаны тренды изменения озерного фонда, тенденция к его снижению в ряде центральных и южных регионов. Среди важнейших причин снижения озерного фонда центра и юга ЕЧР, наряду с ускорившимися в связи с высокой антропогенной нагрузкой процессами «старения озера», называются также практически полное исчезновение естественных ландшафтов на значительной части территории, изменение системы дренажа, в том числе благодаря гидростроительству, разбор вод на различные нужды и, отчасти, климатические изменения. Указано, что в регионах недостаточного увлажнения, наряду с уменьшением площади ряда озера, наблюдается значительное повышение минерализации озерной воды, связанное, прежде всего, со снижением в последние полстолетия притока в них речных вод, разбираемых на различные нужды, а также и с дополнительным поступлением минеральных веществ со сточными водами. Что касается качества озерной воды, проведенный авторами анализ свидетельствует, что, несмотря на улучшение состояния ряда крупнейших озера, в целом экологическое состояние многих водоемов ЕЧР неблагоприятно. Выявлено значительное ухудшение за последние десятилетия качества вод малых и средних озера, в том числе в таких ранее экологически благополучных регионах, как европейский северо-восток. Активное освоение здесь нефтегазовых месторождений обусловило создание развитой инфраструктуры и привело к резкому увеличению антропогенной нагрузки на водные экосистемы. В монографии подробно анализируются меры, предпринятые на ряде крупнейших озера ЕЧР, испытавших на себе существенный антропогенный пресс в 1970–1980-е гг., и способствовавшие улучшению и стабилизации их экологического состояния.

В монографии по озерам Азиатской части России (АЧР) [Измайлова, 2018б] приводятся современные сведения о количественных характеристиках озерного фонда. Подчеркивается, что, несмотря на значительные запасы озерных вод, распределение озера по территории АЧР крайне неравномерно. Основное количество водоемов сосредоточено в равнинной части АЧР, тогда как основные объемы воды содержатся в озерах горных территорий. На равнинные и слабо возвышенные территории приходится менее 60 % площади российской Азии, в их пределах насчитывается > 94 % от общего числа водоемов, в том числе ~ 70 % на морских аккумулятивных, водно-ледниковых и озерно-аллювиальных равнинах прибрежной зоны морей Северного Ледовитого и Тихого океанов. При этом в озерах равнинных территорий сконцентрировано лишь ~ 2 % от всех запасов озерных вод АЧР, тогда как в пределах горных территорий, где расположено лишь ~ 5,6 % от общего числа водоемов, сосредоточено более 98 % всех запасов озерных вод российской Азии, в том числе только в оз. Байкал – 96,2 %. На страницах монографии делается акцент на значительном ухудшении

за последние полстолетия качества озерных вод на значительной части Российской Азии. Подчеркивается, что последствия антропогенного воздействия на водоемы, расположенные в разных регионах, носят различный характер. На сегодняшний день наиболее масштабными проблемами в озерных экосистемах, в силу наиболее высокого экономического развития, характеризуется Уральский регион АЧР. В тоже время наибольшие темпы деградации озерных экосистем отмечаются на северных территориях, затронутых разработкой минерального сырья и нефтегазодобычей. Важнейшим источником загрязнения севера Восточной Сибири на протяжении уже многих лет является Норильский горнодобывающий и металлопроизводящий комбинат, многолетняя работа которого привела к деградации расположенного рядом с ним оз. Пясино и закислению огромного числа озер Таймырского полуострова. Значительное влияние на озерные экосистемы севера АЧР оказала нефтегазодобыча. По мере последовательного продвижения разработок месторождений углеводородов на север, загрязнение затронуло не только более освоенные регионы центра Западной Сибири, но и крайне низко населенные арктические территории. При этом озера прибрежных равнин Северного Ледовитого океана характеризуются значительно меньшей устойчивостью к загрязнениям, и их реакция на воздействия проявляется уже на этапе разведывательных работ. Быстрыми темпами происходит и изменение озерных экосистем, расположенных в регионах недостаточного увлажнения. Антропогенное воздействие сказывается как на качестве вод расположенных здесь водоемов, так и на нарушении их естественного водного баланса.

Последняя монография из серии – «Озёра России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал» [Измайлова, 2018а] – представляет собой обобщение всех исследований, выполненных по оценке водных ресурсов озер России. В ней рассматриваются вопросы об условиях формирования озерных котловин различных типов, выявляются закономерности их распределения по территории страны. Анализируется согласованность водных ресурсов с основными центрами размещения населения, промышленности и сельскохозяйственного производства Российской Федерации. Рассмотрены вопросы современного экологического состояния озерного фонда. Выявлены тенденции его количественных и качественных изменений в различных регионах. На основе анализа современного состояния озерного фонда и его возможных изменений определены основные проблемы лимнологической изученности страны.

Работа над указанной серией монографий позволила специалистам ИНОЗ РАН не только провести обобщение накопленной за десятилетия лимнологической информации и оценить изменения, происходящие с озерными экосистемами различных регионов под воздействием природных и антропогенных факторов, но и существенно продвинуться в области оценок озерного фонда.

Согласно оценке озерного фонда, в пределах Российской Федерации дешифрируется чуть менее 3,8 млн водоёмов естественного происхождения (в том числе ~ 1,37 млн площадью более 1 га) и ~ 100 тыс. искусственного. В пределах ЕЧР дешифрируется более 700 тыс. водоёмов, а АЧР – более 3,15 млн [Измайлова, 2016б, 2018б]. Около 3,65 млн водоёмов РФ (~ 95 % от общего числа) не превосходят по площади 0,2 км², около 180 тыс. имеют площадь зеркала от 0,2 до 10 км², более 1,5 тыс. – от 10 до 100 км², и 153 превышают по площади 100 км².

Площадь водной поверхности всех естественных водоёмов РФ составляет ~ 335 тыс. км², включая озёра с солёной водой (~ 20 тыс. км²), а искусственных ~ 65 тыс. км². Суммарная площадь водной поверхности достигает, таким образом ~ 400 тыс. км², в том числе ~ 125 тыс. км² – в пределах ЕЧР и ~ 275 тыс. км² – в пределах АЧР. Средняя озёрность европейской части страны ~ 3,1 % (естественная озёрность ~ 2,1 %), азиатской ~ 2,1 % (естественная ~ 1,9 %).

Водные ресурсы водоёмов естественного происхождения, расположенных в пределах Российской Федерации, составляют ~ 25 910 км³ воды, из которых более 55 км³ с повышенной минерализацией. Объём пресных озёрных вод ~ 25 855 км³. На долю крупнейших озёр приходится более 97 % общего объёма озёрных вод, в том числе только на оз. Байкал (23 615 км³) – около 91 %. В искусственных водоёмах РФ запас вод составляет ~ 890 км³. Таким образом, суммарный объём вод, заключённых в естественные и искусственные водоёмы, составляет чуть менее 26 800 км³, в том числе пресных ~ 26 745 км³.

Проведённая новая оценка фонда естественных и искусственных водоёмов РФ дала возможность уточнить данные кадастровой оценки, выполненной ещё в 1960-е гг. для всего СССР. Учёт общего числа водных объектов показал, что собственно озёрами, то есть водоёмами с площадью более 1 га,

может называться лишь 1,37 млн водных объектов. В тоже время общее количество дешифрируемых по снимкам водоёмов превышает число, определённое по картографическим материалам 1960-х гг. Полученные в рамках проведенной оценки суммарные площади водной поверхности оказались близки к оценкам, выполненным ранее Госкомгидрометом на основе крупномасштабных карт. В тоже время они существенно превысили результаты, полученные ранее С.В. Рянжиным с использованием статистических методов. На основе полученных данных оценки озерного фонда были подготовлены карты озерности европейской части России, Уральского федерального округа, Российской Федерации (рис. 2.3), а также карты густоты озерной сети РФ (рис. 2.4) [Корнеенкова, Измайлова, 2017; Измайлова, Корнеенкова, 2017; Izmailova, Korneenkova, 2020].

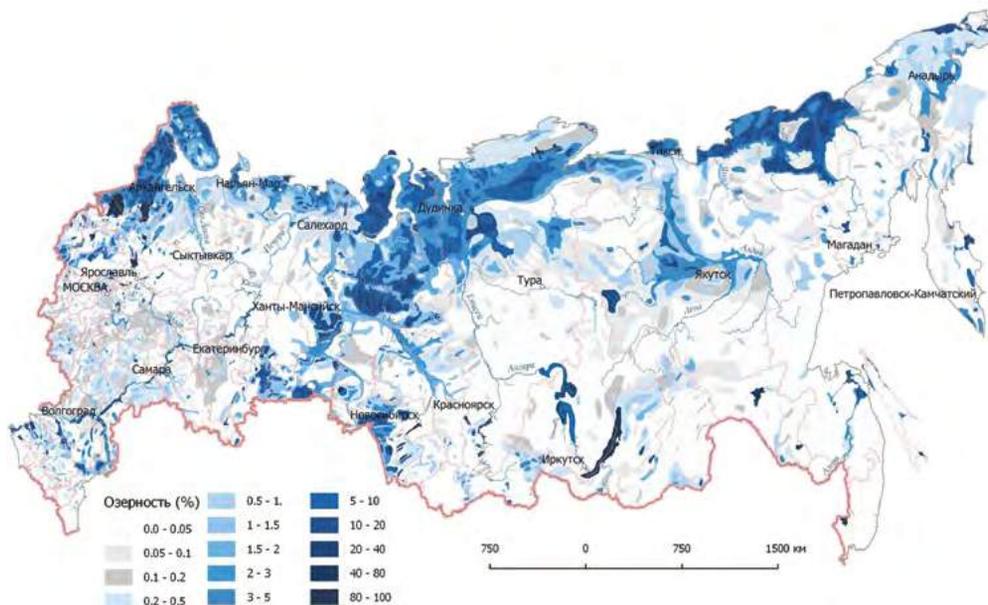


Рис. 2.3. Карта озерности Российской Федерации [Izmailova, 2018b]

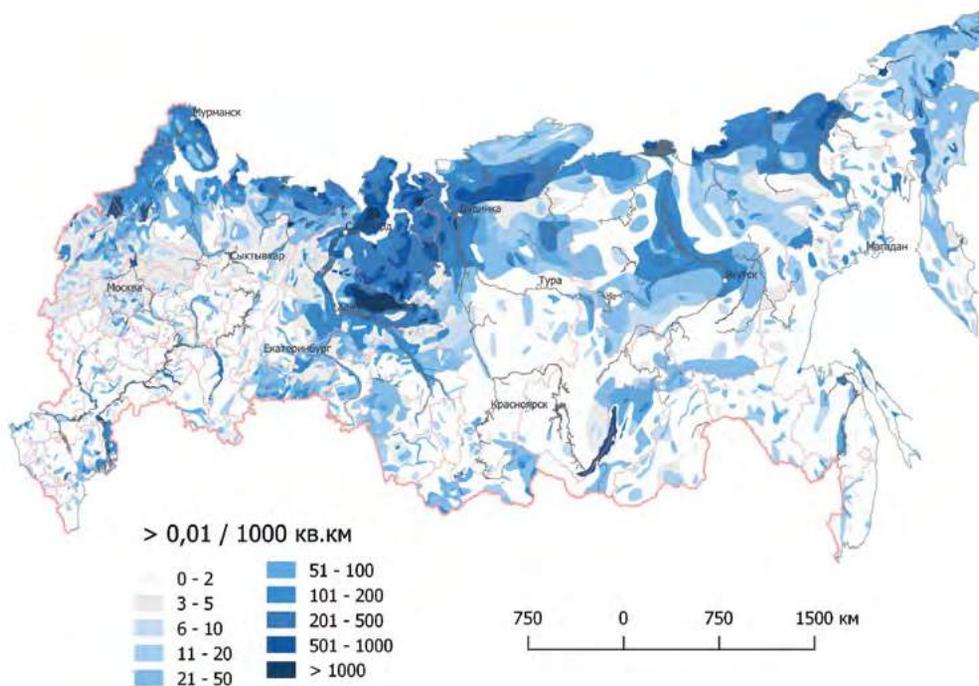


Рис. 2.4. Карта густоты озерной сети Российской Федерации с учетом водоемов, превышающих 1 га [Izmailova, 2018b]

Анализ распределения озёр по территории страны показал, что озерность прежде всего детерминирована геологическими факторами, историей геологического развития региона и гораздо в меньшей степени зависит от его климатических характеристик. Построенные карты озерности и густоты озерной сети, а также полученное распределение средних значений озерности по широтным зонам (рис. 2.5) оспаривают достаточно распространённое в учебной географической литературе мнение, что общее количество озёр с продвижением в засушливые области сокращается. Обилием озёр, прежде всего, характеризуются территории, относительно недавно находившиеся под ледниковым покровом или морскими водами. Центральная часть Русской равнины, расположенная в пределах зоны достаточного увлажнения в области умеренно-континентального климата, характеризуется наименьшими по стране значениями естественной озерности. В тоже время юг Западной Сибири, находящийся в зоне недостаточного увлажнения, характеризуется средней по стране озерностью и имеет значимые запасы озерных вод. Некоторое повышение коэффициентов озерности наблюдается почти вдоль всей южной границы нашей страны.

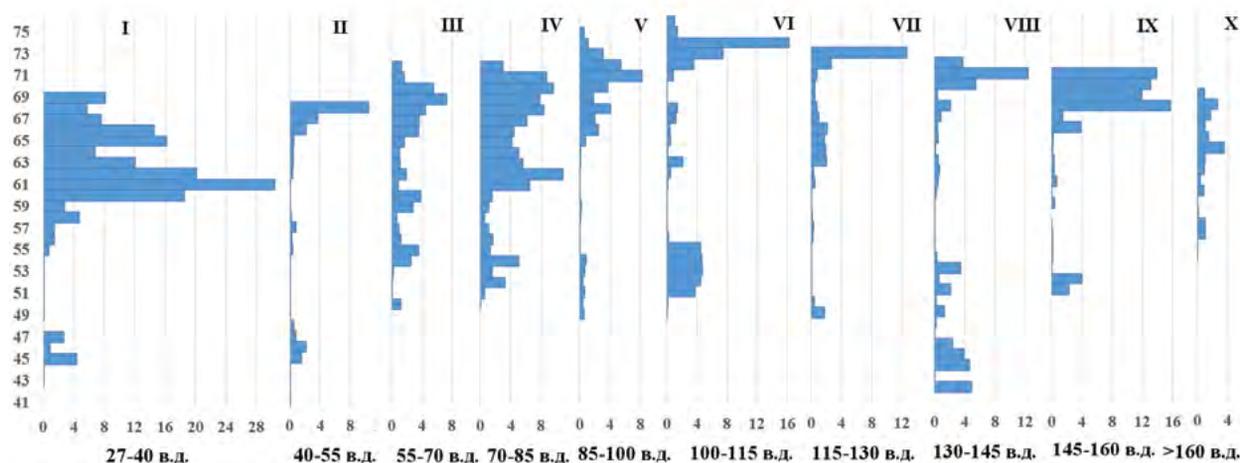


Рис. 2.5. Средняя естественная озерность Российской Федерации, рассчитанная по трапециям (1° широты на 15° долготы)

Продолжением исследований по оценкам озерного фонда страны явилась совместная работа коллектива ИНОЗ РАН с сотрудниками лаборатории гидрологии Института географии РАН (ИГ РАН) в рамках темы «Пространственная структура озерных и речных водных ресурсов России и ее изменение во времени» Программы Президиума РАН «Социально-гуманитарные аспекты устойчивого развития и обеспечения стратегического прорыва России» (2018–2020). Целью проекта являлась оценка водно-ресурсного потенциала российских территорий и выявление возможностей его рационального использования и сохранения в условиях современных социально-экономических трансформаций. Работы ИНОЗ РАН и Лаборатории гидрологии ИГ РАН были направлены на обеспечение всего проекта данными о современном состоянии водных ресурсов России (включая как речные, так и озерные водные ресурсы) и о происходящих с ними структурных изменениях. Основными результатами работ по проекту явились: оценка пространственно-временной структуры речного стока и водопотребления (водозабора, сброса сточных вод, безвозвратного расхода) на территории России [Антропогенные воздействия..., 2019]; сравнительные оценки водообеспеченности территорий, рассчитанные с учетом возобновляемых водных ресурсов и запасов вод в водоемах, характеризующихся замедленным водообменом [Измайлова, 2019]; результаты региональных оценок изменения экологического состояния озерных экосистем в условиях сложившегося природопользования [Современное состояние и проблемы..., 2018; Румянцев, Измайлова, 2019]; анализ влияния снижения экологического состояния водных ресурсов на качество жизни населения арктических регионов [Румянцев, Измайлова, Крючков, 2018; Румянцев, Измайлова, Макаров, 2021].

По результатам оценок водных ресурсов и водообеспеченности Российской Федерации речными и озерными водами А.В. Измайловой и Н.Ю. Корнеенковой был построен комплекс карт (рис. 2.6, 2.7).

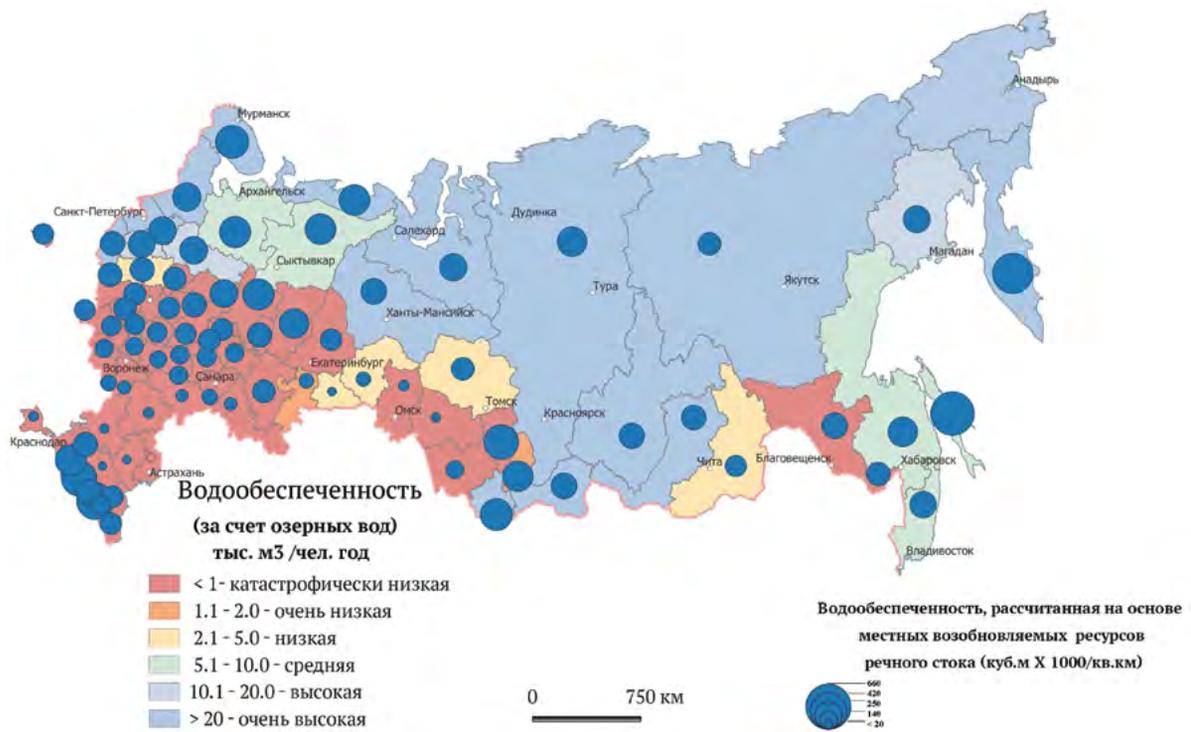


Рис. 2.6. Сопоставление величин водообеспеченности, рассчитанной на основе данных по объёму вод, содержащихся только в естественных водоёмах (в тыс. м³/чел.) с величинами водообеспеченности, рассчитанной на основе данных по местным ресурсам речного стока, приведённым к единице площади (м³/ тыс. км²), по субъектам Федерации

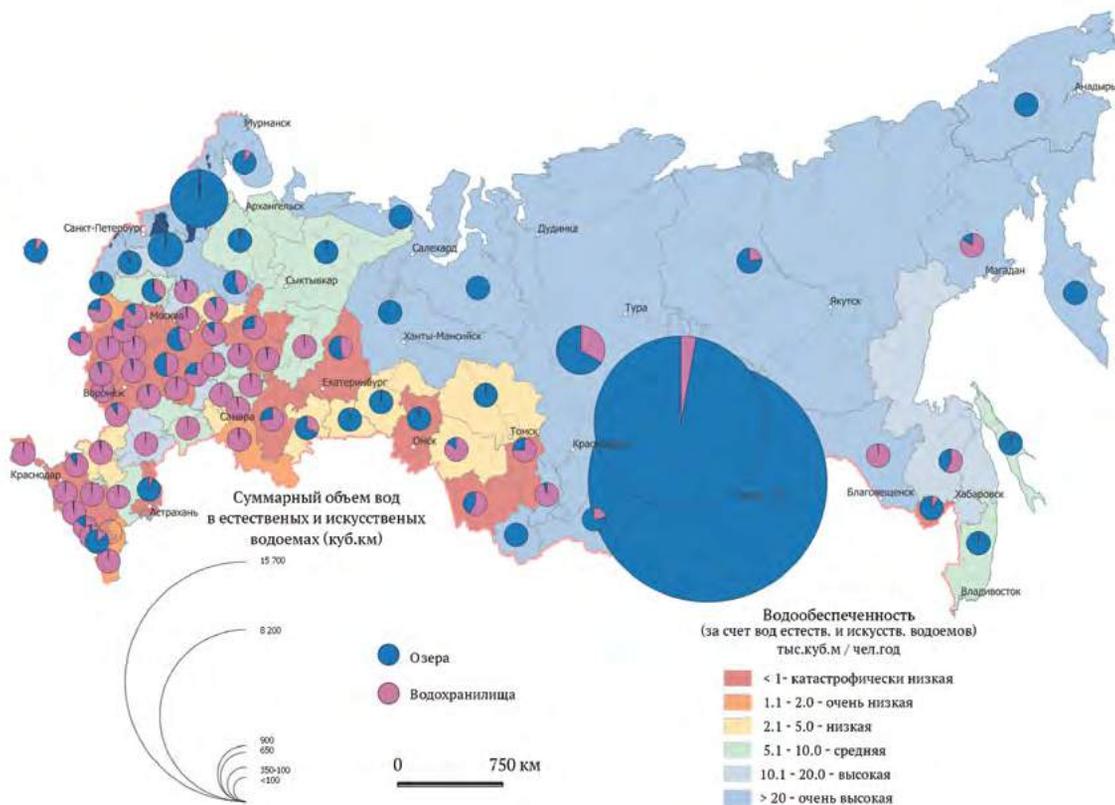


Рис. 2.7. Сопоставление величин водообеспеченности (в тыс. м³/чел.) за счёт вод, содержащихся в естественных и искусственных водоёмах с общим объёмом вод (км³), содержащихся в водоёмах по субъектам Федерации

В рамках исследования было определено, что для Российской Федерации, несмотря на значительные суммарные показатели водного фонда (только в естественных водоёмах содержится 25 855 км³ воды), характерна значительная пространственная неоднородность распределения водных ресурсов и водообеспеченности. Последняя обуславливается как физико-географическими условиями конкретного региона, так и особенностями его экономического развития. Высокими значениями водных ресурсов (как быстро возобновляемых, так и отличающихся замедленным водообменом) характеризуются северные регионы страны, обладающие большими запасами минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, и остающиеся наименее заселёнными и слабо освоенными территориями. Дефицит водных ресурсов наблюдается как в пределах значительной части зоны недостаточного увлажнения, так и в центральной части ЕЧР, отличающейся повышенной плотностью населения и высокой концентрацией промышленного производства. В настоящее время в регионах с низкой и средней водообеспеченностью проживает ~ 60 % населения, в том числе ~ 20 % – в регионах, где водообеспеченность характеризуется как «очень низкая» и «катастрофически низкая» [Измайлова, 2019]. Большинство этих регионов обладают значительными запасами воды, содержащейся в искусственных водоёмах, а некоторые – и значительными запасами озёрных вод.

Проведенный в рамках исследования анализ качественных характеристик озёрного фонда показал, что Россия продолжает характеризоваться значительными стратегическими резервами чистых вод. В больших озёрах ЕЧР более 2/3 суммарного объёма вод остаются олиготрофными и относятся к 1 классу качества [Румянцев, Измайлова, Драбкова, Кондратьев, 2018]. Благодаря озеру Байкал которое, несмотря на целый комплекс проблем в его прибрежной зоне, остаётся относительно чистым по большей части акватории, более 99 % вод, содержащихся в озёрах АЧР с площадями > 100 км², на настоящий момент остаются олиготрофными, и относятся к 1 классу качества [Румянцев, Измайлова, 2019]. Без учёта озера Байкал – около 90 % и более 86 %, соответственно. Качество воды крупнейших водохранилищ существенно хуже, в большинстве своём их наполняют мезотрофные и эвтрофные воды 3-го и 4-го класса [Драбкова, Измайлова, 2014]. Экологическое состояние значительного числа средних и малых водоёмов России крайне неблагоприятно, однако объём содержащихся в них вод мал в сравнении с суммарной величиной водных ресурсов озёр страны.

Полученные в ходе исследования результаты позволили провести оценку изменений, происшедших с озёрным фондом на протяжении XX–начала XXI века, затрагивающих как их качественные, так и количественные характеристики и дать ряд прогнозных оценок. На малых водоёмах центральной и южной частей ЕЧР, наряду с деградацией озёрных экосистем, происходит снижение озёрного фонда. На этих территориях исчезновение малых озёр за последние полстолетия составило до 20 %. Рассматривая ближайшую перспективу, необходимо подчеркнуть, что при сохраняющемся характере природо- и водопользования экологическое состояние большинства озёрных экосистем центра и юга ЕЧР останется крайне неблагоприятным, а сокращение фонда естественных водоёмов продолжится [Измайлова, 2018б].

Неблагоприятное экологическое состояние озёрных экосистем в настоящее время наблюдается также на юге АЧР. В сравнении с центром и югом ЕЧР, ситуация здесь в целом более благоприятная, однако она значительно ухудшается в годы низкой водности, когда большинство негативных процессов на озёрах резко обостряется. В этой связи на ухудшении существующей ситуации в данных регионах могут существенно сказаться климатические изменения. Кроме того, на юго-востоке АЧР следует ожидать существенного усиления транзитного загрязнения, приносимого с речным стоком, в том числе из-за границы [Румянцев, Измайлова, 2019б].

Важнейшей проблемой является наблюдающееся ухудшение экологического состояния озёрных экосистем в пределах равнинных северных территорий России. Арктические озёрные экосистемы в силу своей упрощённости характеризуются повышенной чувствительностью к любым видам антропогенных нагрузок. Существующие планы активного освоения Арктики могут привести к существенному росту загрязнения северных озёр [Румянцев, Измайлова, Крюков, 2018б; Румянцев, Измайлова, Макаров, 2021]. Качество озёрных вод, часто используемых на севере для питьевого водоснабжения, может снизиться до столь опасного предела, что повлечёт увеличение заболеваемости местного населения.

Наряду с общими оценками озёрного фонда в ИНОЗ РАН в рамках Программы Отделения наук о Земле А.В. Измайловой, Н.Ю. Корнеевской и М.В. Шмаковой в 2015 году были инициированы работы по теме «Оценка временной изменчивости водных ресурсов озёр регионов недостаточного

увлажнения, определяемой вариациями климата и антропогенной деятельностью». Их целью явилось уточнение результатов оценки озерных ресурсов Российской Федерации в регионах водного дефицита, водные ресурсы которых характеризуются высокой вариативностью. С учетом полноты существующей гидрометрической и спутниковой информации была разработана методика оценки временной изменчивости водных ресурсов озер в регионах недостаточного увлажнения РФ [Измайлова, Шмакова, 2015]. По всем субъектам федерации, расположенным в зоне водного дефицита, были проанализированы полученные в год средней водности значения водных ресурсов озер и водообеспеченность [Измайлова, 2019]. По избранным озерам, не входящим в число водоемов, по которым проводятся измерения Росгидромета, на основе анализа данных космических снимков были получены временные ряды значений площадей водной поверхности [Корнеенкова, Измайлова 2017; Корнеенкова, Измайлова, 2018; Корнеенкова, 2020]. С целью расчета морфометрических параметров озер было выполнено визуальное, а также автоматизированное дешифрирование разновременных спутниковых изображений Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS, охватывающих период с 1984 по 2017 гг., с использованием многоканальных водных индексов MNDWI и AWEI. В рамках работы, помимо многолетней изменчивости, также исследовалась внутритроговая динамика площадей озер на примере водоемов юга Тюменской области [Корнеенкова, 2018].

Разработка методической базы, на основе которой была проведена оценка водных ресурсов озер Российской Федерации, позволила в 2019 г. инициировать новое исследование ИНОЗ РАН по оценке водных ресурсов всего Евразийского континента в рамках темы НИР «Закономерности распределения озер по территории Евразии и оценка их водных ресурсов» (2019–2023). Основной целью исследования заявлена количественная оценка озерного фонда России как составляющей водных ресурсов Евразийского континента и выявление основных проблем и рисков, связанных с изменениями озерных экосистем, располагающихся в различных природных условиях и испытывающих разное антропогенное давление. В рамках темы выполняется лимнологическое обобщение информации о водных ресурсах озер Евразии и их экологическому состоянию, основанное на актуальных данных, полученных с использованием геоинформационных систем, спутниковой информации, материалах ИНОЗ РАН и анализе зарубежных публикаций.

В связи с появлением новых возможностей получения и обработки спутниковых данных, при оценке количества озер и суммарных площадей водной поверхности Евразийского континента было решено применить современный аппарат обработки спутниковых изображений, включающий автоматизированное дешифрирование водных объектов с использованием глобальных наборов данных, разработанных по материалам архивов спутниковых снимков, позволяющий ускорить проводимую ранее визуально-инструментальную оценку озерного фонда. С этой целью в ранее существовавшую группу исследователей была введена кандидат физико-математических наук Анна Мурадовна Расулова.

Важным этапом работы над темой явилась оценка фонда водоемов Европы с использованием данных массива Global Forest Cover (GFC) [High-resolution global maps..., 2013]. Оценка количества водоемов и площадей водной поверхности Европы базировалась как на визуальном дешифрировании водных объектов на современных спутниковых снимках, предоставляемых программой «Google Планета Земля», так и на автоматизированном дешифрировании с использованием набора данных GFC [Корнеенкова, Измайлова, 2019]. В результате дешифрирования был получен массив площадных характеристик водоемов как естественного, так и искусственного происхождения по всем странам и озерным регионам зарубежной Европы. Полученный массив данных по площадям водоемов был дополнен характеристиками их глубин и объемов содержащихся в них вод, взятых из баз данных «Озера Земли» и WORLDLAKE. Далее, с учетом построенных для различных частей зарубежной Европы зависимостей между морфометрическими характеристиками водоемов, проводился переход от площадных к объемным характеристикам озерного фонда. Для регионов, по которым характер зависимостей для водоемов, отличных по своему происхождению, существенно различался, определялся ряд зависимостей. Чаще всего выделялись искусственные водоемы и водоемы, привязанные к речной сети. Были проведены сравнения озерного фонда европейской части России с озерным фондом зарубежной Европы [Izmailova, Korneenkova, 2020] и анализ распределения озер по территории, построены карты озерности Фенноскандии и Европы.

Согласно проведённой оценке, в пределах Европы на снимках дешифрируется более 1 320 000 водоёмов естественного происхождения и около 430 000 искусственного. Площадь водной поверхности всех водоёмов Европы составляет 284 000 км², из которых около 3/4 приходится на водоёмы естественного происхождения. Средняя озёрность составляет 2,8 %, в том числе естественная (за вычетом площадей искусственных водоёмов) – 2,3 %. В водоемах Европы суммарно содержится 3 785 км³ пресной воды, из которых около 500 км³ – в искусственных водоемах, а также 88 км³ воды повышенной минерализации.

Для Европы характерна значительная неравномерность распределения озёр по территории. Основное их количество (более 2/3) приходится на регионы, оказавшиеся под покровом последнего четвертичного материкового оледенения. В озёрах этих территорий сконцентрированы и основные объёмы озёрных вод (85 %). Ещё 10 % озёрных вод приходится на Альпийский регион, который также в период последнего оледенения был практически полностью покрыт ледниками.

Сравнение водных ресурсов озёр России и зарубежной Европы показало, что, несмотря на наличие двух крупнейших озёр Европы (Ладожское и Онежское) на территории Российской Федерации, суммарный объём ее озёрных вод (около 1 370 км³) меньше, чем в зарубежной Европе (2 002 км³). В России большая часть водных ресурсов сосредоточена в крупных озерах (площадью > 100 км²), их суммарная доля составляет более 90 % от общего объёма водных ресурсов естественных водоемов, в то время как малые и средние водоемы из-за мелководности имеют небольшой водозапас. За счет горного рельефа зарубежной Европы ее малые и средние озера характеризуются большими глубинами, в результате чего в них сосредоточено около 46 % от общего объёма водных ресурсов.

Строительство искусственных водоёмов способствует увеличению озёрности в регионах, характеризующихся дефицитом водных ресурсов, то есть, прежде всего, зоны недостаточного увлажнения, а также районов активной хозяйственной деятельности зоны избыточного увлажнения. В водохранилищах Европы содержится около 500 км³ пресной воды или 15 % от суммарного запаса пресных вод водоёмов Европы. За счёт искусственных водоёмов суммарные запасы вод в ЕЧР увеличены примерно в 1,2 раза, а в зарубежной Европе в 1,1 раза. С одной стороны, это определяется тем, что значительную часть ЕЧР занимает Восточно-Европейская равнина, с другой – приверженностью в эпоху СССР к грандиозным проектам в области гидротехнического строительства, экологическая целесообразность которых в настоящее время подвергается сомнению.

Выполненная оценка водных ресурсов России и Европы проводилась с учетом среднепогодных данных по площадям водоемов и их глубинам. В тоже время, анализ данных по регионам недостаточного увлажнения свидетельствует о высокой временной изменчивости их водных запасов [Измайлова, 2015]. Развитие геоинформационных систем и усовершенствование технологий облачных расчетов дало возможность модернизировать методику расчета площадей водной поверхности [Расулова, 2022], дешифрированных со спутниковых снимков для всей территории континента, за счет использования разновременных снимков, причем не только для регионов недостаточного, но и избыточного увлажнения. Расуловой А.М. и Н.Ю. Корнеевковой была разработана методика оценки площадей суммарной водной поверхности и ее изменений на основе проектов Global Surface Water (GSW) [High-resolution mapping..., 2016] и Google Earth Engine (GEE) [Google Earth Engine]. Данные GSW основаны на снимках Landsat, обработанных с помощью алгоритмов в глобальном масштабе всей поверхности Земли.

К основным результатам работ в период с 2020 по 2022 гг. относятся основанная на проекте GSW количественная оценка естественных и искусственных водоемов стран Средней Азии, Казахстана и Монголии, построенные на их основе карты озёрности Средней Азии и Казахстана в разные по водности периоды, первичная оценка озерного фонда ряда стран Южной, Юго-Восточной Азии, Китая, стран Корейского полуострова и Японии. Проведена оценка изменения общей площади водных ресурсов регионов Европы с 1984 г.

В результате выполненных исследований в пределах Средней Азии без учета озёр, оставшихся в наследие Аральского моря, а также Каспийского моря, дешифрировано более 59 000 водоемов крупнее 0,01 км² суммарной площадью водной поверхности (в год средней водности) более 23 500 тыс. км². В пределах Казахстана без учета Каспийского моря и водоемов на месте Аральского моря дешифрировано 275 000 озёр суммарной площадью поверхности более 87 000 км². Более 5600 озёр Казахстана

превышают по площади 1 км². Анализ озёрного фонда Средней Азии и Казахстана свидетельствует о его значительной временной вариативности. Среди стран Средней Азии наибольшей вариативностью водной поверхности по данным GSW Recurrence (без учета Аральского и Каспийского морей) характеризуется Узбекистан, наименьшей – Таджикистан.

Большое количество озер, как пресных, так и минерализованных, находится в регионах недостаточного увлажнения Российской Федерации. Лимнологическая изученность водоемов зоны водного дефицита России достаточно низкая – лишь относительно небольшое количество расположенных здесь озер входит в систему мониторинга Росгидромета. Оценка временной изменчивости озерных водных ресурсов таких регионов должна опираться на ограниченное количество данных гидрометрических измерений, недостаток которых может быть частично восполнен за счет массивов данных глобального охвата и материалов космической съемки за различные сезоны года и периоды водности.

В 2022 г. была проведена оценка водных ресурсов субтропического, тропического и экваториального климата на базе данных GSW. Данные климатические пояса характерны для стран Южной, Юго-Восточной Азии и части Китая. Суммарная площадь постоянных водоёмов оценена на основе классов GSW в 624 895 км² (или только 10,8 % от всех типов водных поверхностей в исследуемом регионе). Основная часть площади водных поверхностей 1 544 792 км² (26,8 %) приходится на водные ресурсы с неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом. Это связано с тем, что большая часть водных поверхностей приходится на речную сеть, которая сама по себе не является постоянной, т.к. сильно связана с периодом муссонов, особенно в Южной Азии.

Оценка площади водных ресурсов России, как части Евразийского континента, проводилась на основе каталога данных GSW, что позволило оценить масштабы изменений водных ресурсов Евразии с 1984 г. Поскольку расчеты, основанные на каталоге GWS, достаточно сложно выполнимы в масштабах всего континента на стационарном компьютере, все вычисления выполнялись в облачной платформе анализа геопространственных данных GEE. Оценка динамики площади водных ресурсов Евразии проводилась на основе подкаталога GSW Transitions, который фиксирует изменения между первым и последним годом наблюдений по трем основным типам подстилающей поверхности – вода, сезонная вода и суша. В итоговой классификации изменений водной поверхности были выделены следующие классы:

Класс 1: постоянные водные поверхности (поверхности, занимаемые водой круглый год за все годы наблюдений);

Класс 2: новые постоянные водные поверхности (с 1984 по 2022 гг. наблюдений произошел переход суши в постоянные водные поверхности);

Класс 3: исчезнувшие постоянные водные поверхности (за годы наблюдений произошло полное пересыхание постоянных водных поверхностей);

Класс 4: сезонные водные поверхности (водная поверхность присутствует меньше 12 месяцев в году в течение всего изучаемого периода наблюдения);

Класс 5: новые сезонные водные поверхности (за годы наблюдения участок суши стал покрываться сезонной водной поверхностью);

Класс 6: исчезнувшие сезонные водные поверхности (произошло полное пересыхание сезонной водной поверхности);

Класс 7: преобразование сезонной водной поверхности в постоянную;

Класс 8: преобразование постоянной водной поверхности в сезонную;

Класс 9: водная поверхность с неопределенным многолетним гидрологическим режимом (к данному классу относятся поверхности, на которых за три десятилетия наблюдений периодически возникала и исчезала вода, при этом данные явления никак не коррелировали с внутригодовой изменчивостью);

Класс 10: водная поверхность с неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом (к этому типу поверхностей относятся водные пиксели, которые имеют сезонный характер в течение года, но появлялись при этом не каждый год за весь период наблюдений).

При работе над настоящим исследованием весь континент был разделен на пять физико-географических регионов (Европа, Центральная, Восточная, Южная и Передняя Азии) и Россию. В исследовании было выявлено, что на территории России в основном распространены территории,

дешифрованные как постоянные водные поверхности суши – на их площадь приходится около 50 % (2,43 млн км²) от всей площади водных объектов страны. На площади, занимаемыми сезонными водными поверхностями в России, приходится 10,49 % от всей площади водных объектов, а на возникшие новые сезонные территории – 15,17 %, 9 % – на водные поверхности с неопределенным кратковременным гидрологическим режимом и 8,39 % – относится к исчезнувшим сезонным водным поверхностям (рис. 2.8). Из рис. 2.8 видно, что различные классы водной поверхности распределены неравномерно по территории страны. Большая доля постоянных водных поверхностей приходится на арктические, тундровые и северо-таежные природные зоны, за исключением полуострова Таймыр, где на севере наблюдается исчезновение сезонных водных поверхностей и появление водных поверхностей с неопределенными гидрологическими режимами.

Примерно аналогичная ситуация с изменением площадей водных поверхностей происходит в Европейском регионе, где 56 % (461,24 тыс. км²) от площади всей водной поверхности региона занято постоянной и около 13 % новой сезонной водными поверхностями. При этом, как и в России, в Европейском регионе большая часть водных поверхностей приходится на озера.

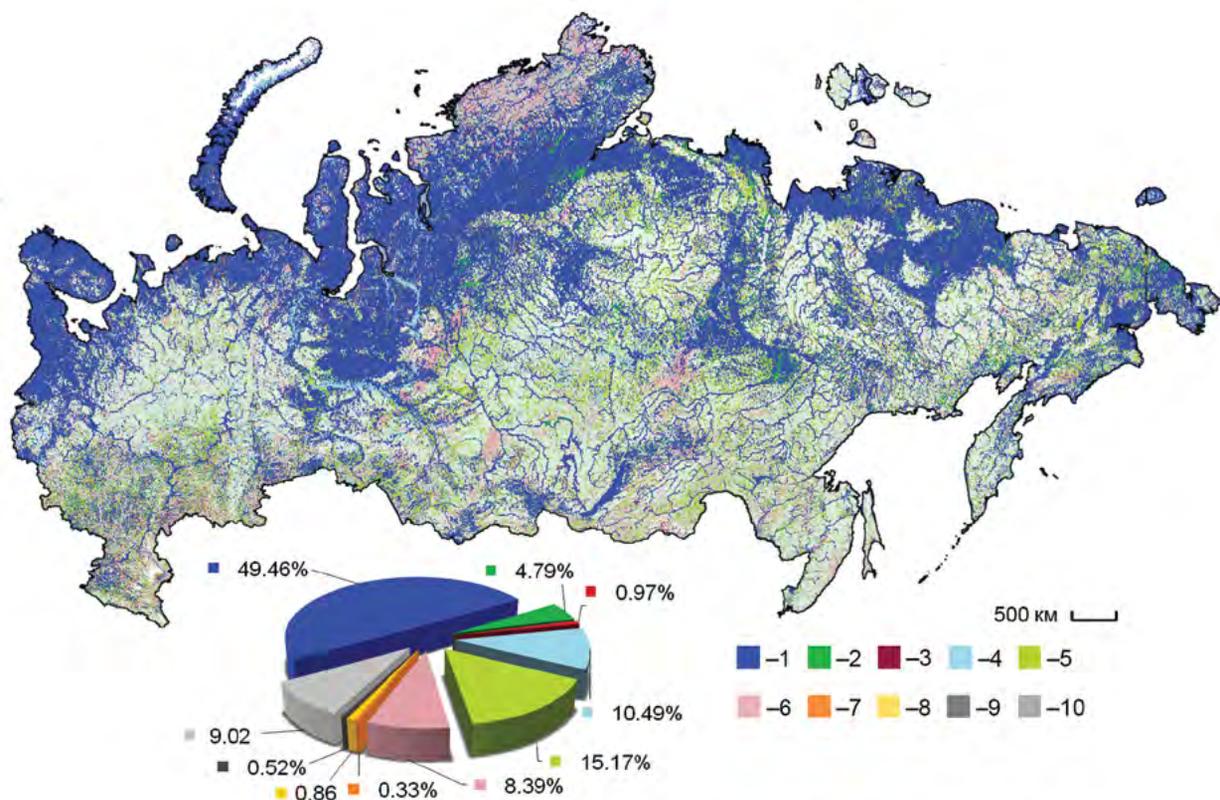


Рис. 2.8. Распределение различных классов водных поверхностей суши по территории России и их процентное отношение от общей площади водной поверхности.

Классы водной поверхности: 1 – постоянные, 2 – новые постоянные, 3 – исчезнувшие постоянные, 4 – сезонные, 5 – новые сезонные, 6 – исчезнувшие сезонные, 7 – преобразование сезонной водной поверхности в постоянную, 8 – преобразование постоянной водной поверхности в сезонную, 9 – водная поверхность с неопределенным многолетним гидрологическим режимом, 10 – водная поверхность с неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом

В остальных регионах континента картина отличается – на площадь постоянных водных поверхностей суши физико-географических регионов Центральной, Восточной, Южной и Передней Азии приходится от 7 до 14 % от площади всех водных поверхностей суши отдельно взятого региона. Основным классом водной поверхности суши в азиатских регионах являются водные поверхности с неопределенным кратковременным гидрологическим режимом – на их долю приходится от 24 до 38 % площади водных поверхностей, в зависимости от региона. Также водные поверхности представлены различными классами сезонной воды. Худшая обстановка в Южной Азии, здесь пре-

валирующим по площади классом водной поверхности является водная поверхность с неопределенным кратковременным гидрологическим режимом (33,62 %), остальные представлены появившейся сезонной (21,33 %) и исчезнувшей сезонной (22,59 %) водной поверхностью, а к постоянной водной поверхности относится только 7 % от всей площади водных объектов в регионе. Водные ресурсы Южной Азии по большей части представлены речной сетью, гидрологический режим которой сильно зависит от муссонов.

Оценка площади водных поверхностей суши по всему Евразийскому континенту (включая Россию) показывает, что на площадь с постоянными водоемами приходится около 30 %, следующим по площади классом являются – водные поверхности с неопределенным кратковременным гидрологическим режимом (18,17 %). Также распространены классы, представленные новыми сезонными (17,58 %), исчезнувшими (13,45 %) и сезонными (10,58 %) водными поверхностями суши. Показано, что примерно 70 % площади постоянных водных поверхностей (включая речную сеть) континента приходится на Россию, при этом доля водных поверхностей с неопределенным кратковременным гидрологическим циклом составляет около 24 % от всей площади водных поверхностей Евразии (рис. 2.9).

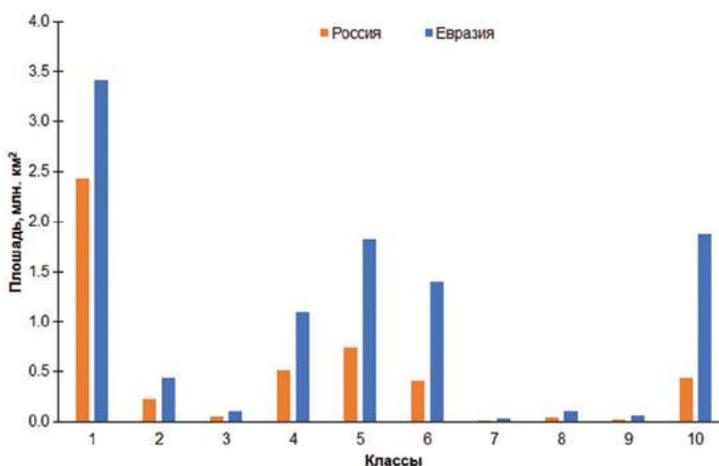


Рис. 2.9. Площади различных классов водной поверхности в России и Евразии.

Классы водной поверхности: 1 – постоянные, 2 – новые постоянные, 3 – исчезнувшие постоянные, 4 – сезонные, 5 – новые сезонные, 6 – исчезнувшие сезонные, 7 – преобразование сезонной водной поверхности в постоянную, 8 – преобразование постоянной водной поверхности в сезонную, 9 – водная поверхность с неопределенным многолетним гидрологическим режимом, 10 – водная поверхность с неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом

Аномальные озера мира. С 2019 по 2022 гг. коллектив Института озерадения в рамках совместного (с 2021 г.) с ГГИ проекта РФФИ № 20-05-00303 «Выявление критериев уникальности озёрных экосистем» под руководством А.В. Измайловой проводил исследования озера мира с целью выявления научно обоснованных критериев поиска уникальности озера. В данном проекте под «уникальными» понимались природные объекты, с резко отличными среди однородной группы водоемов характеристиками.

Актуальность настоящего исследования была вызвана необходимостью совершенствования научных основ отнесения озера экосистем к ООПТ. Работа была направлена на разработку методов автоматизированного поиска уникальных озера и потенциальных кандидатов в ООПТ среди больших выборок водоемов на основе предварительных камеральных работ. Разработанная в результате исследования методика основана на математическом анализе выборок абиотических параметров озера, содержащихся в базе WORLDLAKE и БД озера ООПТ, составленной за время работы над проектом. С чисто формальной точки зрения поиск уникальных озера экосистем сводится к задаче идентификации аномалий.

В исследовании впервые была научно обоснована предварительно выдвинутая и основанная на идеях А.Г. Исаченко [Теоретические вопросы..., 1993] гипотеза о том, что в силу взаимной обусловленности процессов, происходящих в озерах, для одних и тех же водоемов часто выявляются

выбросы по целому ряду параметров [Поздняков, 2020; Измайлова, Расулова, 2020]. При экспертной оценке озер различного происхождения, идентифицированных математическими методами, как аномальные по своим морфометрическим параметрам, неоднократно выявлялось, что они отличаются уникальными для этой группы озер термическими и динамическими характеристиками и содержат необычную для аналогичных озерных экосистем биоту [Измайлова, Расулова, Шмакова, 2021].

Анализ выборок морфометрических параметров вулканических озер показал, что в случае, если распределение морфометрических параметров подчиняется нормальному распределению или легко приводится к нему, для выявления уникальных озер подходят классические статистические критерии поиска выбросов – ящичковая диаграмма и критерий Рошера (метод Томпсона) [Измайлова, 2021a]. При этом выявленные выбросы часто определялись сразу по целой группе морфометрических параметров. Однако, большинство выборок морфометрических параметров озер не приводятся к нормальному распределению [Расулова, 2021б]. В этом случае для анализа выборок озер, сгруппированных по происхождению озерной котловины, применялись методы машинного обучения: изолированный лес (Isolation Forest), локальный фактор выброса (Local Outlier Factor), одноклассовый метод опорных векторов (One-Class Support Vector Machine) [Расулова, Измайлова, 2022], модель двухэтапной кластеризации (TwoStep Cluster) [Корнеенкова, Расулова, 2022]. С помощью приведенных алгоритмов анализировались выборки морфометрических параметров озер карстового, ледникового и вулканического происхождения. Проверка указанных методов также проводилась и для групп водоемов, выделенных по их принадлежности к одной физико-географической стране, расположенных в пределах одного речного водосборного бассейна, на территории единого геохимического ландшафта (при идентификации аномальных озер по гидрохимическим параметрам) [Расулова, 2021a]. Экспертная оценка полученных с помощью различных математических методов наборов озер с аномальными характеристиками на предмет уникальности их экосистем показала, что большинство выделенных водоемов являются уникальными и с учетом других признаков, характеризующих экосистему. Наиболее необычные озера выявлялись фактически каждым из анализируемых методов. Ряд водоемов был идентифицирован только одним или двумя методами. В основном к таким водоемам относились малоизученные озера, часто представляющие интерес для дальнейшего натурального изучения.

За время работы над проектом с помощью картографического материала и спутниковых снимков была собрана база данных по морфометрическим параметрам озер, расположенных на территории ООПТ России (доступна на сайте Института озероведения https://limno.ru/developments/catalogs/lakes_oopt_ru/) [Измайлова, Корнеенкова, 2021]. В БД были включены озера как непосредственно являющиеся объектами охраны, так и расположенные на территории ООПТ. Анализ содержащихся в базе озер, расположенных на ООПТ Северо-Западного ФО РФ, на предмет выявления аномальных характеристик, позволил определить водоемы, требующие дальнейшего натурального изучения и являющиеся потенциальными претендентами на присвоение им статуса охраняемых (https://limno.ru/developments/catalogs/lake_anomaly_phys/).

Разработанная в рамках проекта методика выявления уникальных озер позволяет более четко понять взаимосвязь различных параметров озерной экосистемы, быстрее находить озера-претенденты на присвоения статуса ООПТ, а также оперативно идентифицировать озера, подвергшиеся сильному антропогенному влиянию [Расулова, 2021a].

Пресная вода играет ключевую роль в жизни человека и сейчас становится все более важным фактором социально-экономического развития. Поэтому оценка запасов пресной воды является одной из приоритетных задач при планировании хозяйственной активности. Совсем недавно проблемы, связанные с водными ресурсами, решались путем изъятия речных стоков. Однако, с увеличением хозяйственной деятельности объемы использования статических запасов пресной воды, особенно озерной, постоянно увеличиваются. В связи с этим в России и мире появилась необходимость более внимательно относиться к количественным и качественным характеристикам озер. Все большую актуальность приобретает анализ роли озерного фонда России в водных ресурсах всего континента, а также основных экологических проблем озерных экосистем в различных частях Евразии и факторам, их обуславливающим. С появлением новых возможностей в обработке спутниковых изображений удалось получить более точные данные по количеству водоемов и их суммарным площадям. Однако, до сих пор остается нерешенным основной вопрос: «сколько на Земле озер?».

Глава 3

ИЗУЧЕНИЕ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ КОНТАКТНО-ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ. ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ОЗЕРА

Температура окружающей среды является одним из важнейших определяющих параметров в экосистемах озер. Это так называемый неустраняемый фактор. Термическое состояние крупных озер и водохранилищ во многом определяет трехмерное распределение плотности воды, вертикальную устойчивость водных слоев, и, следовательно, систему преобладающих течений в озерах. Разнообразие видов биологических сообществ в крупных озерах, их пространственная неоднородность и временная изменчивость в значительной мере контролируется вариациями температуры воды. Изучение динамики поля температуры в озере дает физическую основу для понимания особенностей химических и биологических процессов. 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. Без знания закономерностей пространственно-временной изменчивости температуры воды невозможно разрабатывать меры по охране и рациональному использованию природных ресурсов озер. Тепловой режим крупных озёр умеренной климатической зоны может претерпеть изменения при возможном повышении (понижении) температуры воздуха на Земле в будущем. Изменения могут фиксироваться не только в температуре верхнего перемешанного слоя воды и воздуха над ним, но и в сезонной вертикальной термической структуре и ледовом режиме [Адаменко, 1985; Lakes as sentinels..., 2009; Rapid and highly variable..., 2015; Morphometry and average temperature..., 2015].

Среди озер умеренной и субарктической климатических зон выделяются димиктические, к которым относятся водоемы, температура воды которых дважды в год переходит через температуру наибольшей плотности пресной воды (3,98°C) и осуществляется вертикальное перемешивание водной толщи до дна [Тихомиров, 1982]. При этом происходит важное для экологического состояния озера выравнивание гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик по вертикали от поверхности озера до дна.

Крупнейшее в Европе димиктическое озеро – Ладожское озеро занимает 16 место по площади и 14 по объёму среди 253 крупнейших озер мира с площадями более 500 км². Глубокое замерзающее Ладожское озеро (площадь акватории 17 785 км², средняя глубина 48,3 м, максимальная глубина 230 м), расположено в умеренной климатической зоне, что определяет его ледовый режим и четко выраженную ежегодно повторяющуюся последовательность термических структур в течение года [Тихомиров, 1982]. Сроки наступления, продолжительность свободной конвекции и стратификации, скорость заглупления и толщина верхнего перемешанного слоя играют одну из важных ролей в распределении вещества и энергии в крупном водоёме. Димиктические озёра могут отличаться друг от друга по времени наступления тех или иных сезонов, но не отличаются по физическому состоянию (вертикальной и горизонтальной структуре) одноименных сезонов при условии морфометрического сходства котловин.

Ледовые условия в крупном димиктическом озере являются определяющими процессами в зимний период [Тихомиров, 1982; Widespread loss of lake..., 2019]. Озеро каждый год полностью или частично покрывается разными формами льда, причем обмен веществом и энергией на границе раздела вода-воздух претерпевает существенные изменения.

Началом научных исследований Ладожского озера явились исследования, проведённые генерал-лейтенантом корпуса флотских штурманов Александром Петровичем Андреевым (1820–1882)

во второй половине девятнадцатого века, явившиеся результатом 10-летних гидрографических работ на озере. Под его руководством создана карта глубин и организованы первые регулярные измерения уровня Ладожского озера. На фотографии из Национального Архива Республики Карелия (рис. 3.1) можно видеть команду А.П. Андреева, которая непосредственно принимала участие в измерениях в Ладожском озере.

За двухтомную монографию [Андреев, 1875] автор был награжден Императорским Русским Географическим Обществом золотой медалью имени графа Ф.П. Литке. На Международной географической выставке в Париже в 1875 году книга А.П. Андреева также была удостоена Золотой медали.



Рис. 3.1. Команда корпуса флотских штурманов под руководством А.П. Андреева на о. Валаам. Середина 60-х годов XIX века. А.П. Андреев (предположительно четвертый слева). Публикуется впервые

До настоящего времени три крупные монографии, посвященные термике Ладожского озера, – «Ладожское озеро» И.В. Молчанова [1945], «Тепловой режим Ладожского озера» [1968] под редакцией академика С.В. Калесника и «Термика крупных озёр» А.И. Тихомирова [1982] – знаменуют три важных этапа познания закономерностей его термического состояния. Первая монография обобщила все имеющиеся к середине двадцатого века отрывочные сведения о распределении температуры и ледового режима Ладоги и послужила основой для всех дальнейших исследований.

Вторая книга была результатом исследований, начатых комплексной экспедицией Лаборатории озероведения Ленинградского государственного университета, которая в 1971 г. стала Институтом озероведения Академии наук СССР. Эти исследования были основаны на широко поставленных измерениях компонентов теплового баланса озера и его термических съёмках в период открытой воды за 1956–1962 гг. Именно в этот период в Ладожском озере было обнаружено явление термического бара, о возможности существования которого говорилось в конце девятнадцатого века в монографии Ф. Фореля [Forel, 1895], швейцарского естествоиспытателя, «отца лимнологии».



Рис. 3.2. Алексей Иванович Тихомиров
(1919–2004)

Вариации распределения температуры воды от месяца к месяцу в Ладожском озере, взаимосвязь температуры поверхности воды с температурами нижележащих горизонтов, важная роль термического бара для крупных озёр зоны умеренного климата, классификация озёр по термическому режиму представлены в монографии д.г.н. Алексея Ивановича Тихомирова [1982]. Тихомиров А.И. (рис. 3.2) рассматривал изменение трехмерного распределения температуры воды в крупных озёрах как физическую систему взаимодействия водоём-атмосфера в годовом цикле. Были выделены сезонные термические циклы, рассчитаны тепловые балансы для отдельных лет и средние многолетние их значения. С 1956 по 1980-е годы съёмки всего озера в основном проводились на станциях от поверхности до дна и на разрезах вдоль и поперёк озера. Этот этап был заключительным этапом «некомпьютерной» обработки натуральных данных, обобщения многочисленных хорошо спланированных контактных температурных измерений в различные сезоны на Ладожском озере.

Началом нового этапа исследований термических процессов Ладожского озера явились организация и проведение крупномасштабных комплексных лимнологических экспериментов, сочетающих взаимодополняющие друг друга контактные и дистанционные методы, проводимые на Ладожском озере в 1982–1985 гг. под руководством академика Кирилла Яковлевича Кондратьева [Комплексный дистанционный мониторинг озера, 1987]. Дистанционные методы позволяют охватить большие площади в течение небольшого промежутка времени и сделать заключения о синоптической и мезомасштабной пространственной изменчивости лимнических процессов.

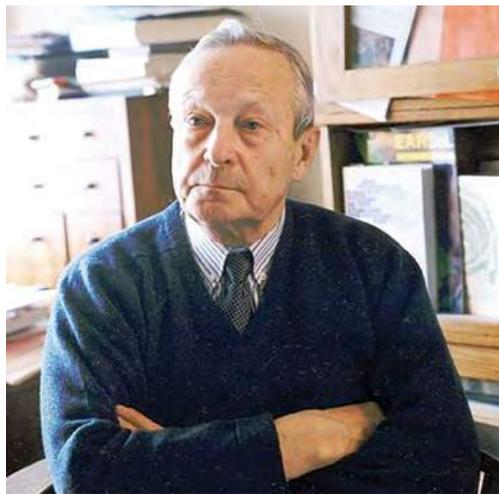


Рис. 3.3. Кирилл Яковлевич Кондратьев
(1920–2006)

Многоуровневые наблюдения (контактные судовые, самолетные и спутниковые наблюдения) были организованы на Ладожском и Онежском озерах, озере Севан в 1982–1985 гг., на Рыбинском водохранилище в 1987 г. Развитием концепции комплексного лимнологического эксперимента явилась программа «Внутренние водоемы – Интеркосмос» [Кондратьев, 1989], выполненная на водоемах России, Болгарии, Германии и многих других стран под руководством академика К.Я. Кондратьева (рис. 3.3).

На основе развития дистанционных методов – метода активной лазерной локации – д.ф.-м.н. Дмитрием Викторовичем Поздняковым были разработаны научно-методические основы системы мониторинга планктонных водорослей в пресноводном водоеме при совместном использовании данных судовых и спутниковых определений [Кондратьев, Поздняков, 1985]. Реализуя концепцию академика К.Я. Кондратьева «Большое озеро

как имитационная модель океана» [Большое озеро как имитационная..., 1986], под руководством Н.Н. Филатова, был спланирован и проведен на Онежском озере в течение 1986–1990 гг. один из первых комплексных крупномасштабных (в масштабах всего озера) лимнологических экспериментов (Эксперимент «Онего») [Филатов, Белецкий, Зайцев, 1990; Филатов, Черноок, Зайцев, 1900].

Точное количественное описание морфометрических характеристик озера, формы его котловины и распределения глубин имеют первостепенное значение для изучения термического и светового режима, течений и волновых процессов, геоморфологических особенностей дна и берегов, ледовых явлений и других разномасштабных термогидродинамических процессов в большом озере. Современный

уровень познания озёр базируется на создании батиметрических моделей, позволяющих достаточно полно с использованием статистических методов изучать недоступный для визуального наблюдения подводный рельеф [Антропогенное эвтрофирование Ладожского..., 1982; Науменко, 2015].

Впервые в российской лимнологии в 1993 г. в Институте озероведения АН СССР начала создаваться цифровая батиметрическая модель Ладожского озера под руководством член-корреспондента АН СССР А.И. Сорокина [Науменко, 1995; Sorokin, Naumenko, Veselova, 1996]. Модель позволила уточнить запасы воды в озере, установить зависимости площади и объёма от высоты уровня над «0» Балтийской системы высот, географически привязывать спутниковую информацию, построить трехмерную поверхность дна озера. На основе созданной цифровой батиметрической модели Ладожского озера [Науменко, 2013; Naumenko, 2020] было проведено лимническое районирование и выделено шесть районов: 1) мелководный с глубинами от 0 до 18 м; 2) переходный (18–50 м), 3) район озерного уступа (50–70 м), 4) склоновый (70–100 м), 5) глубоководный (100–140 м), 6) впадины, не соединяющиеся друг с другом, с глубинами более 140 м. В последующие годы были созданы цифровые батиметрические модели – Онежского озера [Науменко, 2000; Науменко, 2015], озера Ильмень [Озеро Ильмень: Определение..., 2015], а также малых высокогорных озер Армении [First Multy-Proxy Studies..., 2019] и Нижегородской области [Науменко, Гузиватый, Сапелко, 2014]. Необходимым и важным этапом развития изучения Ладожского озера явилось создание цифровой модели высот его водосбора, позволившей уточнить количественные параметры территории [Науменко, Каретников, 2005].

С 1993 г. создаётся компьютерный банк лимнологической информации по Ладожскому озеру [Гузиватый, Каретников, Науменко, 1998]. Впервые для Ладожского озера создана многоцелевая база данных для получения статистически значимых гидрологических характеристик всего водоема и его районов и для различных временных интервалов. Банк данных представляет необходимый источник информации для всех исследователей, работа которых связана с изучением крупных озёр: экологическим моделированием, исследованием процессов загрязнения и распространения примесей, расчетом составляющих теплового и водного балансов, климатических колебаний характеристик. В настоящее время база данных включает в себя более 700 000 измерений гидрометеорологических параметров и сопутствующих характеристик (дата, координаты, глубина места и т.п.).

В настоящее время комплексные гидрофизические исследования Ладожского озера выполняются под руководством профессора, доктора географических наук Михаила Арсеньевича Науменко вместе с коллегами (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Сотрудники Лаборатории географии и гидрологии
А.М. Крючков, М.А. Науменко, С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый.
Фото 2011 г.

Созданные гидрофизическая и ледовая базы данных и цифровые батиметрические модели позволили проводить исследования на качественно новом уровне, расширить и уточнить наши знания о процессах, происходящих на озере. Совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого был определён возраст воды Ладожского озера с использованием радионуклидов, что подтвердило условный период водообмена Ладожского озера ≈ 12 лет [Радиоактивные нуклиды как показатели..., 2003].

Среднегодовой ход температуры воды. При описании термического режима крупных озер обычно оперируют среднегодовым ходом температуры поверхности воды и водной массы (как всего озера, так и его отдельных районов) [Науменко, Гузиватый, 2010], которые позволяют определить средние характеристики периодов нагревания и охлаждения водоемов, соотношение температур для этих периодов. На основе рассмотрения годового хода температуры поверхности воды озер мира проведена их классификация [Рянжин, 1991]. Отклонения от среднего годового хода характеризуют термические особенности того или иного года в многолетнем цикле и свидетельствуют о возможных климатических вариациях.

Обширная база гидрометеорологических данных и цифровая батиметрическая модель Ладожского озера позволили рассчитать заново его средние климатические характеристики с учетом скорректированного объема озера и площади [Науменко, Гузиватый, 2010]. Среднегодовая температура водной массы Ладожского озера составляет $3,8^{\circ}\text{C}$, а среднегодовая температура поверхности озера – $5,5^{\circ}\text{C}$ при среднегодовой амплитуде температуры поверхности воды $\sim 17^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура поверхности озера достигается в августе, максимальное теплосодержание – в сентябре. Годовая амплитуда придонных температур воды невелика и зависит от глубины лимнической зоны озера. Для глубин более 70 м температура колеблется в течение года от 2°C до 6°C .

Средняя температура водной массы озера меньше 4°C около 200 дней в году и остальные 165 дней превышает её, достигая максимума, равного $7,8^{\circ}\text{C}$ в первой декаде сентября. Минимальную температуру водной массы ($0,6^{\circ}\text{C}$), так же, как и наименьшее теплосодержание, Ладожское озеро имеет в первой декаде апреля. Эти величины представляют собой климатически значимые физические параметры, важные как для сравнения с другими димиктическими озерами мира, так и для анализа климатических изменений и верификации термогидродинамических моделей. Сезонный ход теплосодержания различных районов, а также всего озера был рассчитан на основе среднееголетних данных [Науменко, Гузиватый, 2010]. Были рассчитаны величины теплосодержания, характеризующие экстремальное (минимальное и максимальное) состояние озера. Среднегодовая температура водной массы Ладожского озера ниже температуры наибольшей плотности – это свидетельствует о том, что значительное количество приходящего тепла идет на нагревание водной массы до температуры наибольшей плотности, т.е. на свободно-конвективное перемешивание. По расчётам Е. Беннета [Bennett, 1978] среднегодовая температура водной массы оз. Верхнего, одного из Великих американских озер, так же, как и Ладожского озера, ниже температуры 4°C .

В [Науменко, Каретников, Гузиватый..., 2000] показано, что существует ярко выраженная термическая дифференциация лимнических районов в течение годового цикла. В зависимости от площади и объема воды теплосодержание лимнических районов изменяется по сезонам, пропорционально средней интегральной температуре водной толщи каждого района. Также продемонстрировано, что для различных лимнических районов озера существует явление температурного гистерезиса для периода открытой воды с мая по ноябрь [Науменко, Гузиватый, 2022a]. Выявлены особенности сезонного хода нагревания и охлаждения как поверхности воды, так и водной толщи шести различных районов озера в зависимости от температуры приводного слоя воздуха (рис. 3.5). Для периода нагревания температура поверхности воды растет значительно быстрее температуры всей водной массы озера. В середине июня она превышает среднегодовую температуру водной массы воды на 4°C , что приводит к большим горизонтальным градиентам температуры.

На основе натуральных данных и найденных значимых корреляционных связей между средними климатическими циклами температуры воздуха, температуры поверхности воды и интегральной температуры лимнических районов были получены оценки изменения температуры воды при изменении температуры воздуха на один градус. Эти приращения зависят от абсолютной температуры воздуха и, следовательно, от даты, когда эта температура возникает. Для периода нагревания

максимальное приращение температуры воды происходит при максимальных температурах воздуха, причем это имеет место в самом глубоководном районе при формировании устойчивой стратификации. В первой декаде июля заканчивается свободная конвекция в глубоководной части озера, что приводит к формированию первичной стратификации всего озера, температура приводного слоя достигает 15–16°C [Науменко, 2021a]. В этот период скорость роста температуры поверхности Ладожского озера максимальна.

Выводы, полученные на основе анализа климатических соотношений между измеренными температурами воздуха и воды Ладожского озера, подтверждают модельные расчеты [Piccolroaz, Toffolon, Majone, 2013]. Скорость изменения температуры воды зависит от температуры приводного воздуха, T_a . При одной и той же температуре воздуха в период открытой воды для режимов нагревания и охлаждения изменения температуры воды различны для разных районов крупного озера. Повышение температуры воздуха по-разному будет влиять на рост температуры воды в разные сезоны, что необходимо учитывать при оценках возможных климатических изменений в Ладожском озере [Науменко, Гузиватый, Каретников, 2006; Seasonality of change..., 2017]. В период охлаждения в сентябре–октябре, когда сформировался мощный верхний квазиоднородный слой (ВКС), горизонтальные температурные контрасты с синоптическими масштабами становятся незначительными, даже при значительном воздействии ветра на поверхность озера. Выявлены два важных периода при охлаждении Ладожского озера: первый, когда температура поверхности имеет постоянную величину с минимальной пространственной дисперсией; второй, когда вся водная толща озера имеет одинаковую температуру воды с минимальной пространственной дисперсией. Эти периоды и значения температур воды и воздуха могут служить климатическими реперами (нормами) при климатических исследованиях [Науменко, Гузиватый, 2022a].

Пространственная неоднородность термических процессов в Ладожском озере: фронтальный раздел (термобар), слой скачка. Дистанционные и контактные измерения температуры поверхности крупных озёр свидетельствуют о её значительной пространственной неоднородности различных масштабов от сантиметров до десятков и сотен километров. В пресноводных бассейнах пространственное распределение температуры приводит к формированию неоднородных полей плотности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, и наряду с ветровым воздействи-

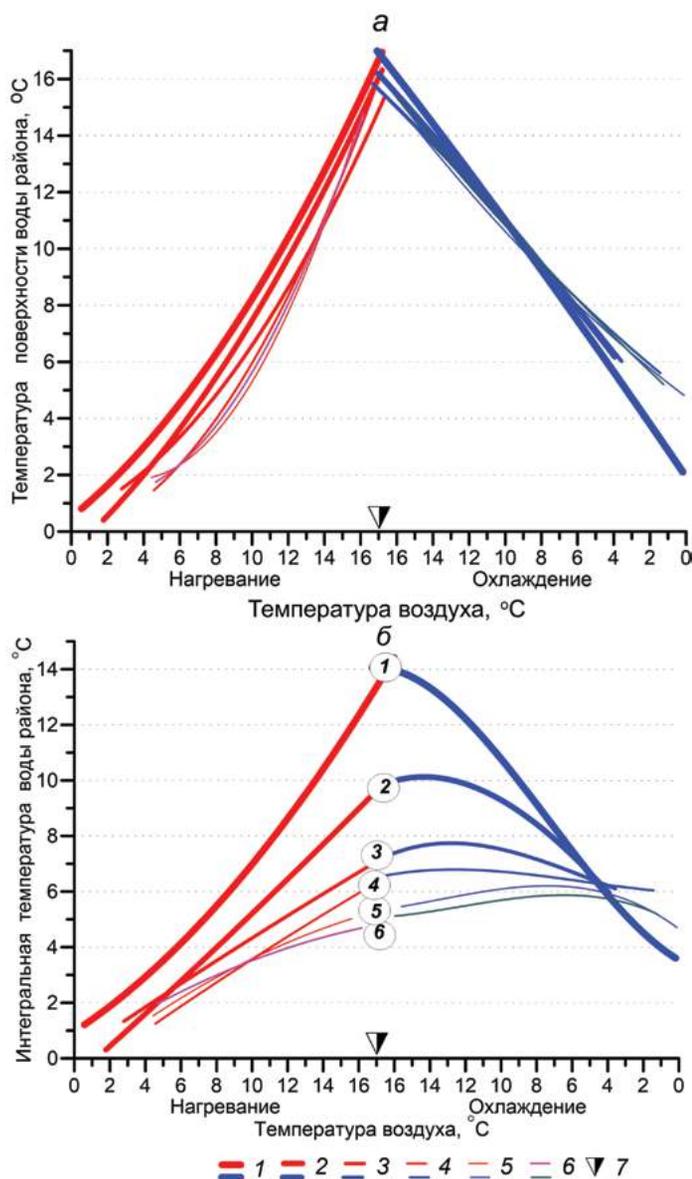


Рис. 3.5. Изменения температуры поверхности воды (а) и интегральной температуры лимнических районов Ладожского озера в зависимости от температуры приводного слоя воздуха для периода нагревания и охлаждения (б)

ем к трехмерным движениям водных масс, которые влияют на перераспределение биогенных элементов и биоты. В период нагревания возрастает влияние пространственной неоднородности подстилающей озерной поверхности на атмосферные процессы в приводном слое, а также возникают обратные связи.

С использованием базы данных разработаны методики построения и анализа пространственного распределения ежесуточных изменений температуры поверхности воды, температуры и влажности приводного воздуха, а также среднемесячного распределения облачности и прозрачности по всей акватории Ладожского озера для периода открытой воды [Науменко, Каретников, Гузиватый..., 2000; Науменко, Каретников, 2002, Naumenko, 2008]. Результаты приведены в двух изданиях атласа Ладожского озера [Ладожское озеро: Атлас, 2002; Ладожское озеро и достопримечательности..., 2015] и являются необходимым параметром при экологическом моделировании, климатических исследованиях, рыбном промысле и прогнозах погоды.

Весенняя фронтальная зона (термобар). Одна из характерных особенностей термогидродинамики крупных димиктических озёр определяется фундаментальным свойством пресной воды, связанным с увеличением плотности при повышении температуры от 0°C до 4°C. Ежегодно в весенний период после начала таяния льда в прибрежной мелководной зоне озера конвективное перемешивание быстрее достигает дна, и дальнейшее нагревание водной толщи идет в условиях возникшей устойчивой стратификации плотности воды [Тихомиров, 1982; Rodgers, 1966]. В глубоководной зоне температура поверхности воды не может стабильно превысить температуру наибольшей плотности (4°C) до тех пор, пока вся толща от поверхности до дна в этом месте не будет устойчиво стратифицирована. Эта дифференциация процессов нагревания приводит к возникновению двух соседствующих различных вертикальных структур водной толщи. Прибрежные воды имеют устойчивую плотностную стратификацию, а в глубоководной части озера вертикальное распределение плотности квазиизотропное и процессы конвективного перемешивания интенсивно продолжаются [Тихомиров, 1982]. Между этими термическими структурами возникает фронтальная зона с наибольшими горизонтальными градиентами температуры, названная Ф. Форелем термобаром. В димиктических озерах появление, развитие и диссипация термобара происходит ежегодно. Осенняя фронтальная зона в Ладожском озере аналогична весенней, но прибрежные районы имеют температуру ниже 4°C, а температуры центрально-озерных вод не превышают 6°C, поэтому горизонтальные градиенты температуры воды значительно меньше весенних. Таким образом, ежегодно Ладожское озеро претерпевает два периода полного перемешивания: весной и осенью перед образованием льда. В эти периоды происходит обмен различными субстанциями (кислородом, биогенными элементами) от поверхности до дна.

Основным проявлением весеннего фронтального раздела на поверхности воды является наличие больших горизонтальных градиентов температуры воды, превышающих средние по озеру в десятки раз, в области 4-градусной изотермы [Науменко, 1989]. Термобар в Ладожском озере существует в среднем более двух месяцев – с начала мая до начала июля. Фронтальная зона перемещается в направлении увеличения глубин озера. Эволюция термической фронтальной зоны в крупном димиктическом озере – это возникновение и продвижение вертикальной плотностной стратификации от берегов вглубь водоема. Было показано, что в период нагревания Ладожского озера с мая по июль, когда существует весенняя фронтальная зона, имеет место значимая корреляционная связь между распределением температуры и глубин в озере [Науменко, Каретников, 2002]. Наибольшая пространственная неоднородность температуры поверхности воды имеет место на последних стадиях существования весенней термической зоны в начале июля, за месяц до достижения максимальной температуры поверхности воды всего озера. В этот период интенсифицируется геострофическая циклоническая циркуляция.

Дата исчезновения на поверхности 4-градусной изотермы является датой возникновения первоначальной стратификации всего озера и имеет важное значение для гидрофизических и гидробиологических процессов, а также для оценки абиотической составляющей экологического состояния в озере [Rodgers, 1987; Moll, Bratkovich, Chang, Pu, 1993; Malm, Mironov, Terzhevik, Jönsson, 1994]. Эта дата является климатической характерной величиной (репером) при изучении межгодовых изменений термического состояния крупных димиктических озёр.

Климатические схемы распределения весенней фронтальной зоны на поверхности Ладожского озера приведены в Атласе [Ладожское озеро и достопримечательности..., 2015]. Разработаны эмпирические соотношения между температурами поверхности воды, приводного воздуха и площадями стратифицированной и изотермической областей в период наибольшей пространственной неоднородности в Ладожском озере [Науменко, 2021a]. Определена среднеклиматическая дата возникновения термического бара в прибрежной части Ладожского озера (26 апреля). С этой даты площадь изотермической области, занимающая всю акваторию озера, начинает уменьшаться. Вместе с движением фронтальной зоны изменяется соотношением площадей стратифицированной и квазиизотермической областей. Разработано нелинейное уравнение, позволяющее определить на любую дату площадь в долях единицы, подверженную свободной конвекции, для средних климатических условий. Средняя многолетняя дата формирования устойчивой плотностной стратификации (исчезновения термобара) в Ладожском озере – 10 июля.

Весной 2010 г. осуществлен натурный эксперимент «Термический фронт – Ладога – 2010» [Натурный эксперимент..., 2012]. Были проведены квазисинхронные спутниковые и контактные измерения температуры воды во время двух последовательных съемок с измерением гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров в зоне взаимодействия стратифицированных и квазиизотермических вод. Эти измерения позволили проследить скорость движения фронта и трансформацию лимнических процессов во фронтальной зоне, особенно в приповерхностных и придонных горизонтах.

Слой скачка (термоклин). Термическая структура крупного озера характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, которая определяется сезонными изменениями прихода тепла на поверхность озера и его распространением вглубь. Одновременно на термическую структуру водоема влияет синоптическая изменчивость процессов и распределение глубин. Параметры сезонной стратификации озера, связанные с вертикальными температурными градиентами, имеют центральное значение в описании и моделировании гидродинамики озера. После возникновения полной стратификации озера важную роль в переносе тепла по вертикали играет слой скачка. Изучение формирования, эволюция и диссипация слоя скачка, ежегодно возникающим в крупных озёрах, является неотъемлемым элементом исследования вертикальной структуры вод озёр.

Исследование сезонных и внутрисезонных вариаций основных параметров слоя скачка в Ладожском озере требует анализа большого объёма информации, которая хранится в специализированной базе данных Института озероведения РАН. Для единообразного определения параметров слоя скачка в крупном озере была создана методика и программное обеспечение, позволяющее обрабатывать большие массивы данных о вертикальном распределении температуры воды [Науменко, Гузиватый, 2022б].

Важным аспектом исследования изменчивости температуры поверхности воды и параметров слоя скачка явилось разделение сезонного хода на период нагревания (I) и охлаждения (II). На рис. 3.6а показан временной ход температуры поверхности воды T_w центральной части Ладожского озера, температуры поверхности максимального вертикального градиента плотности T_{Gmax} и температура верхней границы гипolimниона T_{hl} . Сезонный ход температуры поверхности озера асимметричен, период нагревания от начала возникновения устойчивой стратификации (17 июня) до макс T_w равен 49 суток тогда, как продолжительность периода охлаждения до полного вертикального перемешивания в первой декаде ноября (9 ноября) составляет 93 суток. Временной интервал между крайними вертикальными штриховыми прямыми, указывающими на весеннюю и осеннюю вертикальную изотермию, составляет 142 суток и может служить климатическим репером при анализе возможных колебаний.

На рис. 3.6б показана эволюция трех границ слоя скачка: верхней границы слоя скачка h_w (или что одно и тоже толщина ВКС), максимального градиента плотности воды h_{Gmax} и нижней границы слоя скачка h_l . Среднеклиматический сезонный ход параметров устойчивой вертикальной стратификации в центральной части Ладожского озера закономерно изменяется с начала весенней стратификации до полного осеннего перемешивания. На основе большого количества натурных измерений были разработаны физически обоснованные эмпирические временные зависимости для параметров стратификации с высокими коэффициентами детерминации. Для среднеклиматического сезонного

хода температуры поверхности озера T (верхнего квазиоднородного слоя T_w) и температуры на глубине максимума градиента плотности в слое скачка T_{Gmax} было использовано следующее уравнение:

$$T(t) = a_1 \cdot t^d \cdot e^{ct} \quad (1)$$

где $t = x/100$, x – количество суток от начала года, a_1 , c , d – эмпирические коэффициенты. В период устойчивой стратификации температура нижней границы слоя скачка h_1 или, что одно и тоже температура верхней границы гипolimниона квазипостоянна и не превышает $t_b = 5,5^\circ\text{C}$, равна максимальной за год придонной температуре в центре озера, когда свободная конвекция достигает дна и возникает вертикальная изотермия в осенний период.

Для среднеклиматической временной зависимости изменения глубины границ слоя скачка в период весенне-летней стратификации использовалась показательная функция:

$$h(t) = a_2^{t+r} \quad (2)$$

где a_2 , r – эмпирические коэффициенты.

Глубину каждой из трех границ слоя скачка: верхней границы слоя скачка h_w , максимального градиента плотности воды h_{Gmax} и нижней границы слоя скачка h_1 с конца июня до начала ноября можно определить на основе (2). Эмпирические коэффициенты a_1 , d , c , a_2 , r для регрессионных зависимостей (1) и (2) приведены в [Науменко, Гузиватый, 2022б]. Используемые регрессионные зависимости, как для температуры воды, так и для глубины верхнего квазиоднородного слоя ВКС, слоя скачка и нижней границы термоклина пересекаются в одной точке, соответствующей дате полного вертикального перемешивания.

Эволюция климатического режима термической структуры водной толщи озера в период устойчивой стратификации указывает на нелинейную зависимость заглублиения ВКС и слоя скачка от момента его возникновения до достижения дна.

После прохождения термобара на определенной вертикали гипolimнион занимает практически всю водную толщу от поверхности до дна [Rodgers, 1966]. Рис. 3.5в демонстрирует медленное увеличение толщины ВКС с июня по начало августа и затем ее дальнейшее резкое увеличение, что подчеркивает физическую сущность процесса заглублиения ВКС или верхней границы термоклина в осенний период, когда наступает полное вертикальное перемешивание. После начала периода охлаждения в результате свободной конвекции идет значительное увеличение как толщины ВКС, так и толщины слоя скачка (рис. 3.6в). В период максимального теплосодержания озера во второй половине сентября толщина ВКС и слоя скачка сравниваются и составляют $\sim 16,2$ м. при глубине максимального градиента плотности около 25 м. Максимальная толщина слоя скачка в это время достигает 23 % от глубины места.

Таким образом, анализ сезонного хода вертикального распределения температуры воды позволил выявить особенности пространственно-временной изменчивости параметров вертикальной плотностной стратификации, оценить мощность эпи-, мета- и гипolimниона для среднеклиматических условий. Фактически полученные результаты являются климатическими нормами для центральной части Ладожского озера и отклонения от них могут характеризовать межгодовые изменения стратификации и параметров слоя скачка.

Предложенные методические разработки позволили получить новые надежные количественные оценки эволюции слоя скачка в центральной части Ладожского озера и представляются весьма перспективными при изучении других димиктических озёр или районов водоема с другими глубинами, в том числе для построения карт параметров слоя скачка. Полученные результаты могут быть использованы в качестве начальных и граничных условий при гидродинамическом моделировании Ладожского озера, а также при верификации модельных расчётов.

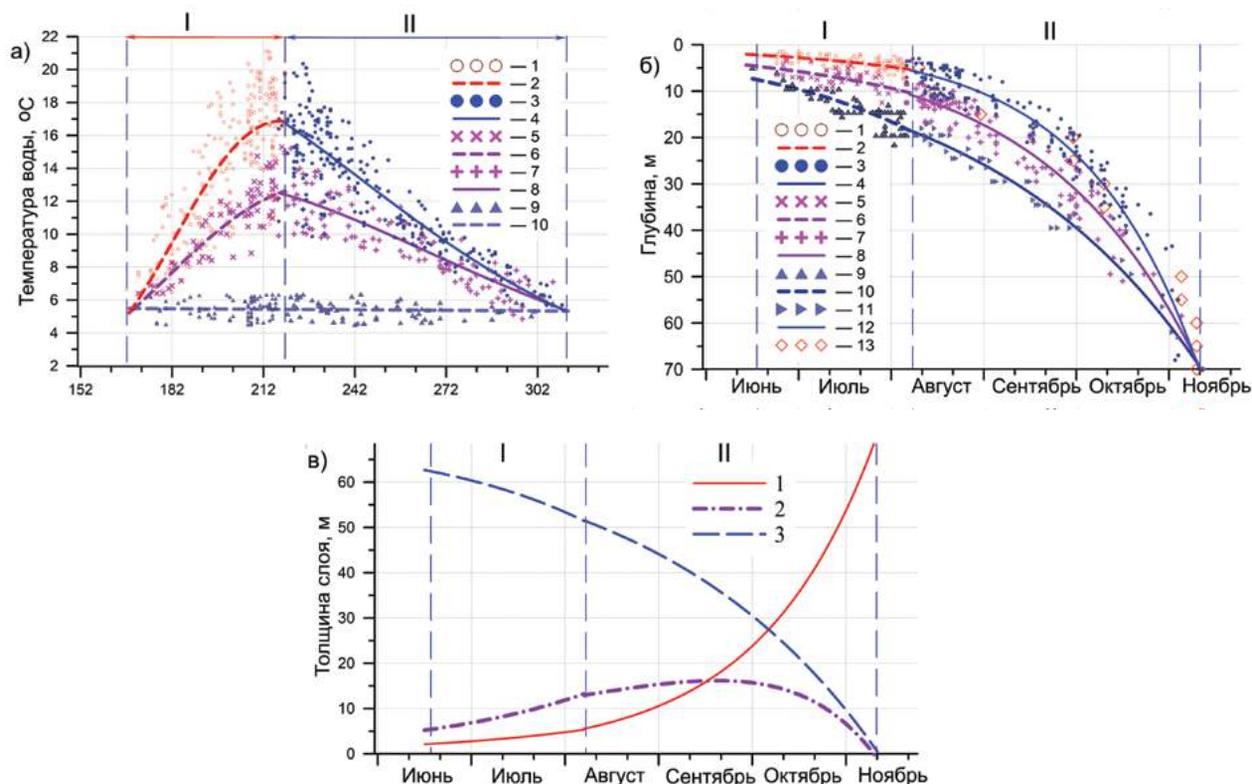


Рис. 3.6. Сезонный ход параметров устойчивой стратификации для периодов нагревания (I) и охлаждения (II) поверхности Ладожского озера: а) температуры поверхности (1, 3) и её аппроксимация (2, 4); температуры в слое скачка (5, 7) и её аппроксимация (6, 8); температуры на нижней границе (9) и её аппроксимация (10); б) заглужения верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) (1, 3) и его аппроксимация (2, 4); заглужения максимального градиента плотности воды (5, 7) и его аппроксимация (6, 8); заглужения нижней границы слоя скачка (9, 11) и его аппроксимация (10, 12); в) толщины ВКС) (1), толщины слоя скачка (2), толщины гипolimниона (3)

Ледовый режим Ладожского озера. Для крупных димиктических озёр большое значение имеет период существования на их поверхности ледовых явлений. Частичный ледовый покров уменьшает, а полный – практически прекращает обмен теплом и количеством движения между атмосферой и водной толщей озера. Вариации ледового режима крупного озера в основном обусловлены пространственно-временной изменчивостью тепловых потоков через поверхность воды в зимний период, а также распределением глубин и региональными межгодовыми характеристиками суровости зимы. Ледовый режим Ладожского озера 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. Мониторинг текущего ледового состояния Ладожского озера необходим для уточнения сроков завершения и особенно начала судоходства. Информация о ледовых явлениях важна при прокладке ледовых трасс и организации автомобильного сообщения с островами Валаам и Коневец, на которых расположены действующие монастыри. Эндемичный вид тюленей, обитающий на Ладожском озере, выводит свое потомство в зимний период на льду.

Длительные наблюдения за ледовым режимом Ладожского озера являются индикатором изменения локального климата [Widespread loss of lake..., 2019]. Наблюдения за пространственным распределением ледяного покрова на Ладожском озере дистанционными методами ведутся, с 1943 г., когда для обеспечения «Дороги жизни» были необходимы сведения о замерзании и вскрытии озера. До 1996 г. регулярные ледовые авиаразведки проводило ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Результаты этих обследований публиковались и рассылались заинтересованным организациям в виде картосхем пространственного распределения льда с учетом его сплоченности (рис. 3.7а). Позже на смену ледовым авиаразведкам пришли спутниковые данные, которые по настоящее время остаются основными для анализа пространственного

распределения льда. Информация с группы спектрорадиометров MODIS (спутник Terra) является регулярной и наиболее доступной для характеристики ледяного покрова Ладожского озера. Для лучшей визуализации ледовых явлений применялся композиционный снимок 7-2-1 спектральных каналов (рис. 3.7б) с пространственным разрешением в видимом участке спектра 250 м на пиксель.

Данные о состоянии подстилающей поверхности с этих спутников доступны только в безоблачные дни. При длительном отсутствии безоблачных дней применялась информация со спутника Sentinel-1 (рис. 3.7в) в радиодиапазоне SAR с пространственным разрешением 100 м на пиксель. Для каждой авиаразведки или космоснимка с 1943 г. по единой методике был определен процент покрытия озера льдом с учетом сплоченности с точностью 10 %. За период около 80 лет было обработано более 1300 съёмок и создана база данных степени покрытости озера льдом с соответствующей датой. Хронологические графики изменения процента покрытости озера льдом за все зимы представлены на рис. 3.8.

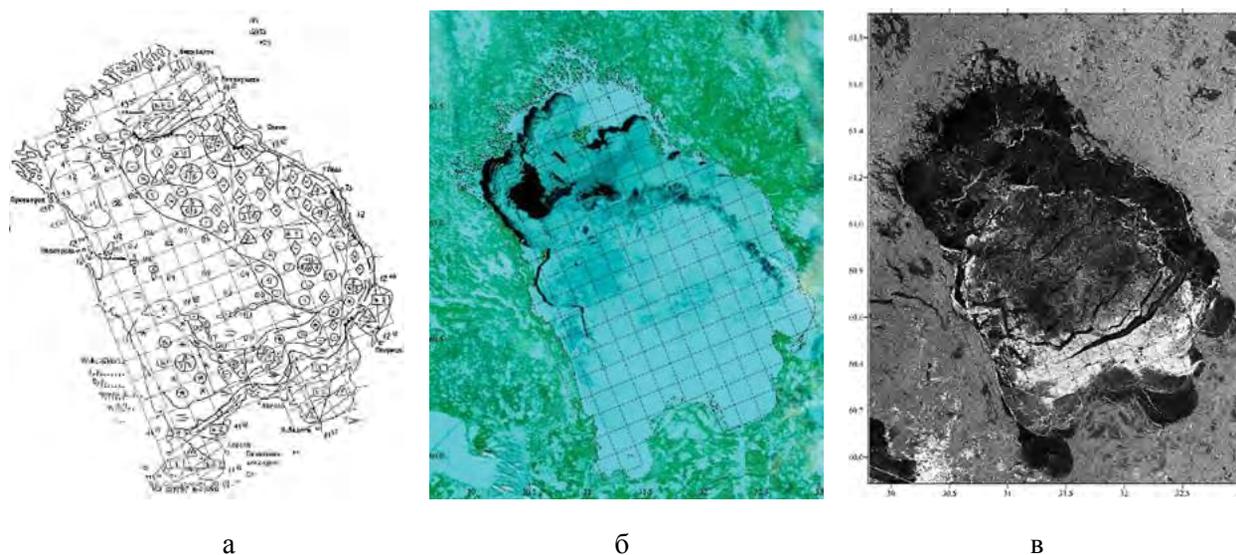


Рис. 3.7. Примеры дистанционной информации о ледовом покрытии Ладожского озера
 а – схема авиаразведки 29/01/90, б – композиционный снимок каналов 7-2-1 MODIS 18/02/21,
 в – снимок SAR спутника Sentinel-1 20/02/21

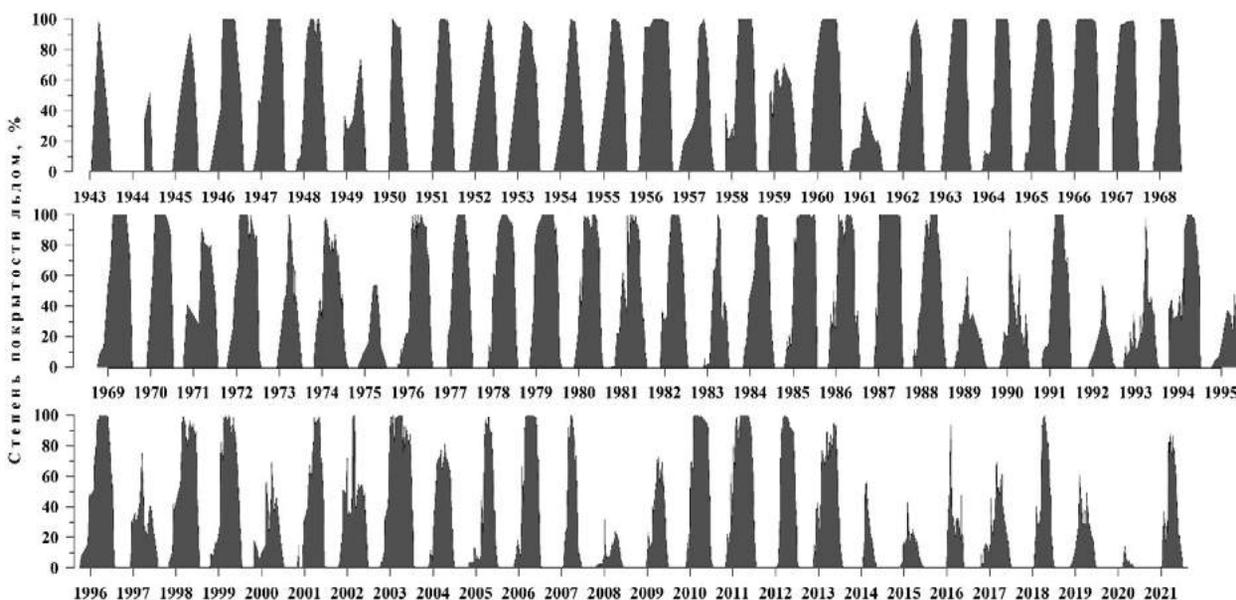


Рис. 3.8. Межгодовые изменения степени покрытия льдом Ладожского озера

Средняя общая продолжительность ледовых явлений в Ладожском озере составляет 172 ± 3 суток [Karetnikov, Naumenko, 2011] с конца ноября по первую декаду мая, но в 2007 году лед появился в первой декаде января и растаял в середине апреля. Период, когда озеро полностью покрыто льдом (если он наступает) составляет около 60 суток, его продолжительность может варьировать в широких пределах от нескольких дней до почти 4 месяцев. Начиная с зимы 2013–2014 года, полный ледостав на всей акватории Ладожского озера наблюдался только один раз, зимой 2017–2018 года. В другие годы, как правило, оставалась термическая полынья в северо-западной части озера над самыми большими глубинами.

Для характеристики зимнего температурного режима Ладожского озера были использованы данные метеостанции Сортавала, расположенной на самом севере водоема. В качестве параметра, определяющего межгодовое изменение теплового состояния, степени суровости зимы, была принята сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха.

По хронологическим графикам изменения степени покрытости озера льдом для каждой зимы рассчитывался безразмерный индекс ледовитости RICI, позволяющий сравнивать зимы между собой. Чем больше зимой будет площадь открытой воды и продолжительность ее существования, тем меньше будет RICI [Науменко, Каретников, 2021]. На рис. 3.9 показана статистически значимая корреляционная зависимость между накопленной за зиму суммой среднесуточных отрицательных температур воздуха и относительным индексом ледовитости RICI.

Самой холодной зимой с 1943 г. была зима 1955–1956 года, индекс ледовитости RICI был выше среднего на 45 % при максимальной сумме отрицательных температур воздуха более 1600°C [Науменко, Каретников, 2021]. Экстремально теплой была зима 2020 года, когда максимальное распространение льда по поверхности озера не превысило 20 %, $\text{RICI} = 2,3$ %, а сумма отрицательных градусодней – 86. Зависимости на рис. 3.9 позволяют определить минимальную среднегодовую температуру воздуха (красные линии) равную $6,8^{\circ}\text{C}$, что соответствует теоретическим оценкам [Widespread loss of lake..., 2019]. При такой температуре озеро не будет замерзать. Минимальная среднегодовая температура воздуха лишь на $0,3^{\circ}\text{C}$ больше температуры, зафиксированной в 2020 г.

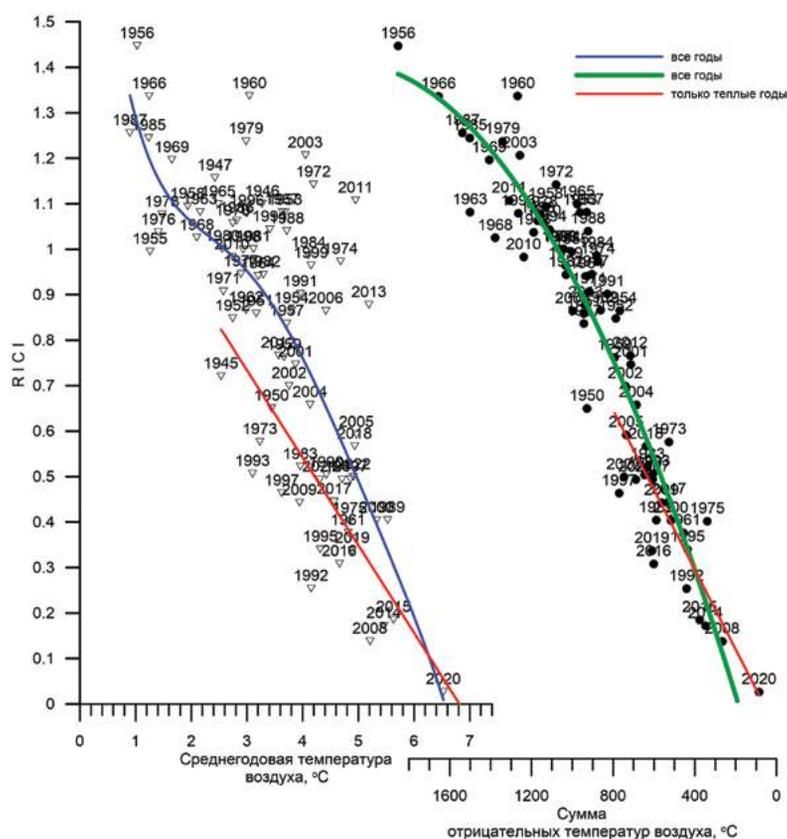


Рис. 3.9. Зависимость относительного индекса ледовитости (RICI) Ладожского озера от среднегодовой температуры (а) и накопленной суммы среднесуточных температур воздуха за зиму (б) по данным метеостанции Сортавала

Климатические вариации термического и ледового режима Ладожского озера. Озёра играют ключевую роль в качестве индикаторов, интеграторов и регуляторов климатических изменений [Williamson, Saros, Vincent, Smol, 2009]. В настоящее время среднесезонное распределение гидрологических и гидрофизических характеристик в крупных озёрах Земли достаточно хорошо изучено. Наиболее актуальной является проблема оценки реакции озера на разномасштабные климатические вариации, вызывающие внутригодовые и межгодовые термические изменения [Влияние изменений климата..., 2006; Влияние изменений климата..., 2014; Rapid and highly variable..., 2015], необходимо обнаруживать как постепенные, так и резкие изменения тепловых характеристик, поскольку с помощью этой информации можно оценить вероятный отклик озера на будущие климатические воздействия [Науменко, 2021б; Widespread loss of lake..., 2021]. В настоящее время выявлены индикаторы воздействия изменений климата на пресноводные экосистемы [Indicators of the effects..., 2023]. Для Ладожского озера в настоящей главе рассматриваются следующие индикаторы: изменения ледовых явлений и температуры воздуха, дат возникновения и диссипации весенней фронтальной зоны и продолжительности существования прямой стратификации в период открытой воды за период с 1943 по 2018 гг.

Среднегодовая температура воздуха по м/с Сортавала, начиная с 2013 г., всегда превышала 4,5°C, достигнув 4,9°C в 2018 г., что на 1° больше средней температуры за период 1979–2018 гг. В аномально тёплый 2020 г. среднегодовая температура воздуха составила 6,5°C. Среднегодовая амплитуда среднемесячных температур воздуха по м/с Сортавала равна ~ 28,5°C. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе выполнена в работах [Крышнякова, Малинин, 2009; Панин, Соломонова, Выручалкина, 2009; Ульянец, Мاستрюков, Червякова, Угрюмов, 2010; Влияние изменений климата..., 2013]. Наиболее значимое наблюдаемое изменение климата на водосборной территории Ладожского озера в конце двадцатого – начале двадцать первого века происходит за счет зимне-весеннего периода.

Об изменении зимнего режима говорит тот факт, что, начиная с 2000 до 2023 года, Ладожское озеро тринадцать зимних сезонов не покрывалось полностью льдом. Более того, начиная с 2013 г., практически десять зим подряд (за исключением зим 2015–2016 и 2017–2018 гг., когда вся акватория озера покрылась льдом лишь на несколько суток) Ладожское озеро не покрывалось льдом полностью, что произошло впервые за период дистанционных наблюдений [Науменко, Каретников, 2021]. Это подтверждает выводы [Filazzola, Blagrove, Imrit, Sharma, 2023] о повышении частоты лет с минимальным ледовым покрытием для замерзающих озёр в современный период и указывает на связь ледовых явлений с повышением температуры воздуха. Годы с открытой поверхностью зимой, безусловно, приведут к значительной перестройке экологических процессов в крупном озере.

Для Ладожского озера выявлен значимый тренд среднегодовых температур воздуха за период 1979–2018 гг., он составляет более 30 % общей дисперсии процесса [Науменко, 2021в]. Неоднородность среднемесячных температур для весенних месяцев за период 1979–2018 гг. является важной особенностью временных рядов, указывающей на произошедшую перестройку по сравнению с предыдущим тридцатилетним периодом с тенденцией на увеличение весенних температур воздуха на севере Ладожского озера [Науменко, Каретников, 2017].

На зимне-весеннее потепление за последние тридцать лет в районе озера указывает статистически значимое уменьшение периода (на 12 суток) отрицательных температур воздуха, а также значимое увеличение среднемесячных, минимальных и максимальных температур в марте–апреле [Науменко, Каретников, 2017]. С 1979 по 2018 гг. начало устойчивого перехода через 0°C в сторону положительных температур происходит раньше на 8 дней, чем в предыдущие тридцать лет: в конце марта, а не в первой декаде апреля.

Для Ладожского озера выявлены значимые тренды среднемесячной температуры воздуха [Науменко, 2021в], которые имели место в период 1979–2018 гг. в ноябре–декабре и были наибольшими (0,08–0,1°C/год) по сравнению со значимыми трендами мая, июля, августа и сентября (0,04–0,06°C/год). Наибольший коэффициент детерминации отмечен в августе и сентябре (25 %), для остальных трендов он составлял 10 %. В весенний период, когда температура воды в прибрежной части начинает превышать 4°C, формируется весенняя фронтальная зона. Среднеклиматическая дата возникновения фронта в Ладожском озере 26 апреля, а окончание 10 июля [Науменко, 2021а].

В настоящее время в связи с тем, что ледовые явления заканчиваются раньше, термобар также имеет тенденцию возникать раньше. Зимний режим Ладожского озера, неравномерность прихода тепла на поверхности в период развития фронтальной зоны и синоптические условия, особенно ветровая ситуация на этапах диссипации фронта, имеют принципиальное значение для оценки положения фронта в крупном озере [Блохина, 2018; Fine-scale spatial variation..., 2016; Науменко, 2021a]. В двадцать первом веке возникновение и исчезновение 4-х градусной изотермы на поверхности Ладожского озера происходит на две-три недели раньше климатической нормы при резком уменьшении ледового покрытия в зимний период [Каретников, Науменко, 2021].

При переходе температуры поверхности воды через 4°C вертикальная термическая стратификация водной толщи становится устойчивой. Это одна из важнейших физических характеристик водной толщи, определяющая жизненный цикл озер, а именно доступность света, питательных веществ, углерода и кислорода для организмов. Очевидно, что более раннее исчезновение термобара приводит к более раннему возникновению устойчивой стратификации, увеличению продолжительности ее существования и накоплению тепла в озерах. Сдвиги в сроках начала и конца периода стратификации обнаружены в озерах Великобритании и Ирландии [George, Hurley, Hewitt., 2007; Livingstone, 2003]. Указанные сдвиги усиливают удержание растворенного кислорода, питательных веществ, частиц и неподвижных организмов в определенных слоях озера.

Раннее по сравнению с климатической нормой возникновение фронтальной зоны в прибрежной части Ладожского озера и более раннее исчезновение 4-градусной изотермы в глубоководной части озера связано с уменьшением степени ледовитости Ладожского озера в начале XXI века, с более ранними датами устойчивого перехода температур воздуха через 0°C и соответствующим увеличением приходящего тепла на поверхность озера, а также уменьшением средней скорости ветра за период существования фронтальной зоны [Каретников, Науменко, 2021].

Возможное отсутствие льда на поверхности Ладожского озера в будущие зимы приведёт к более раннему началу прогрева озера с увеличением поступления тепла и света в зимний период в водную массу, ветровому перемешиванию при открытой свободной поверхности, более раннему возникновению термической фронтальной зоны, первичной полной стратификации озера и, как следствие, перестройке экосистемы озера [Науменко, 2021в]. При сохранении незамерзающей поверхности Ладожского озера от зимы к зиме вероятен переход озера из димиктического типа к мономиктическому [The impact of the changing..., 2009; Global lake thermal..., 2020].

Морфометрические особенности подводного склона Валаамского архипелага. Формы подводного рельефа, параметры его пространственной изменчивости, определяемые различным происхождением и развитием, оказывают значимое влияние на неоднородность седиментационных процессов и их трансформацию в озёрных котловинах. Постоянные и периодические придонные течения во многом определяются пространственными морфоструктурными особенностями распределения глубин дна. Остров Валаам является крупнейшим островом одноимённого архипелага, расположенного в северной наиболее глубоководной части Ладожского озера. До настоящего времени не проводились специальные морфометрические исследования для определения особенностей подводного рельефа Валаамского архипелага, имеющего признаки сейсмической активности.

Для более детальной количественной оценки расположения глубин и уклонов дна в районе острова Валаам в 2015 и 2017 гг. были проведены специальные морфометрические измерения юго-западной части острова с использованием эхолота, совмещённого с гидролокатором бокового обзора и спутниковой навигационной системой, а также подводной видеосъёмки.

Была создана цифровая модель Валаамского архипелага в пределах 61,3°–61,5° с. ш. и 30,7°–31,4° в. д. (рис. 3.10) [Науменко, Гузиватый, Нестеров, Субетто, 2019; Подводная морфоструктура Валаамского..., 2022] на основе доступных карт и результатов непосредственных измерений глубин. Эта модель явилась основой для количественных оценок распределения глубин и уклонов подводного рельефа указанного района Ладожского озера. Она включает в себя высоты, глубины и максимальные уклоны с пространственным разрешением 25×25 м (общее количество узлов – 405 581).

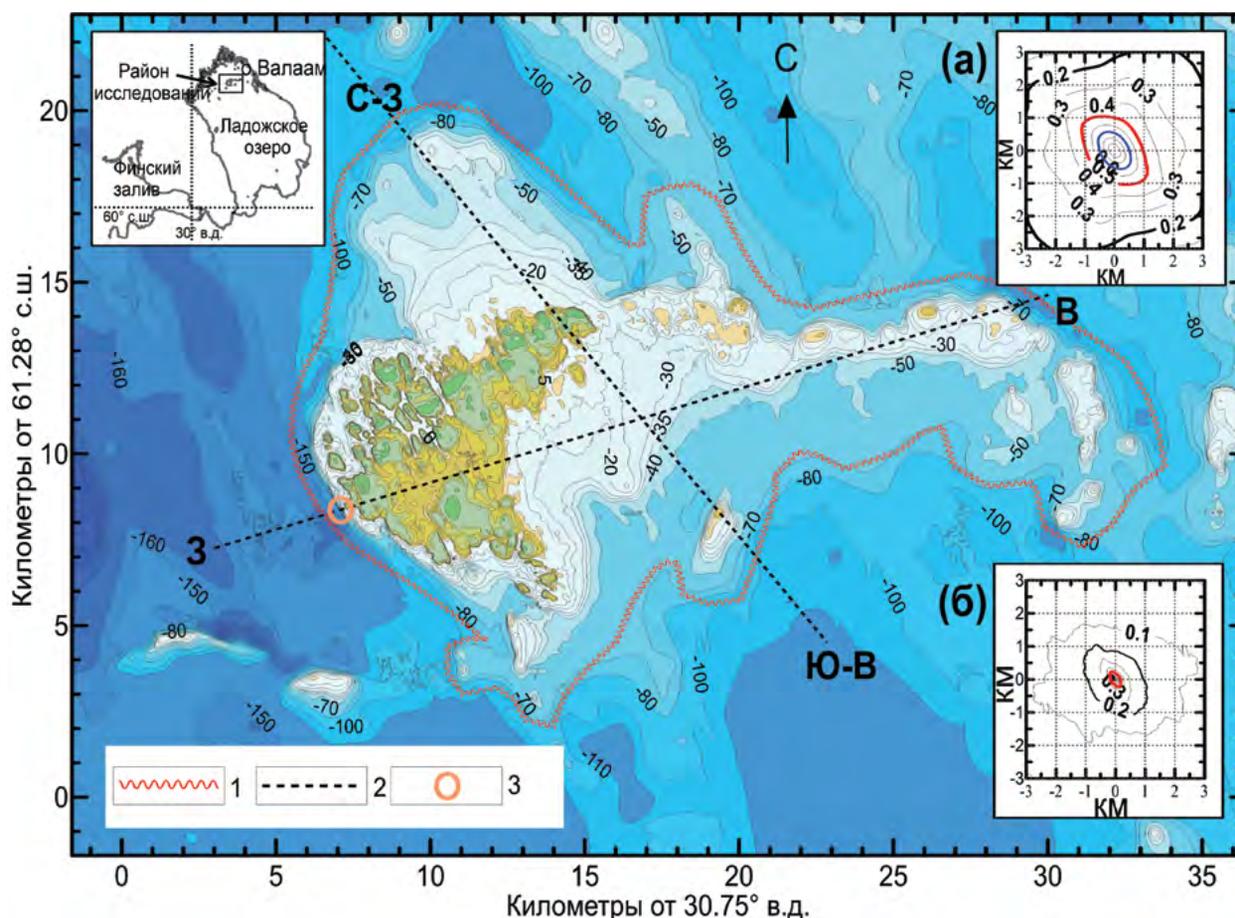


Рис. 3.10. Валаамский архипелаг и предполагаемая граница силла.

1 – предполагаемая граница силла, 2 – положение разрезов, представленных на рис. 3.10а, 3 – район проведения фотосъемки подводного склона. На врезке – район исследований, двумерная пространственная корреляционная функция глубин Валаамского архипелага – (а) и уклонов – (б)

Все острова Валаамско-Салминской островной гряды имеют общее происхождение и единство геологической основы – это интрузивный рифейский силл, тектонически раздробленный на разновеликие блоки. Общими особенностями систем трещиноватости и блокового строения габбро-долеритов определяется тип береговой линии и морфология береговых скальных уступов. Остров Валаам имеет крутые подводные склоны и асимметричную форму. Окаймляющее подводное плато острова располагается на глубинах 50–70 м. С юго-запада и запада остров отделяется от наиболее глубоководного отрога нешироким уступом-плато с глубинами 150–170 м и подверженный неравномерному поднятию со скоростью около 3 мм/год [Современные движения земной..., 2011]. Для визуализации силла предположительные границы показаны красной линией (площадь 253,5 км²) (рис. 3.10), располагающейся на глубинах от 56 до 164 м при средней глубине 91,9±0,3 м. Двумерная пространственная автокорреляционная функция как глубин, так и уклонов (рис. 3.10а и 3.10б) указывает на незначительные расстояния L , на которых существует значимая статистическая связь с коэффициентом корреляции $k \geq 0,5$. Для глубин L изменяется от 0,9 до 1,5 км, для уклонов L – от 140 до 260 м. Длинная ось «эллипсов анизотропии» имеет направление северо-запад-юго-восток, что соответствует направлениям линеаментов [Анохин, Науменко, Нестеров, 2016], разрывных нарушений [Свириденко, Светов, 2008] и подтверждено с использованием длительных GPS-измерений [Современные движения земной..., 2011] и натурных моделей [Агибалов, Сенцов, Зайцев, 2019].

На основе представленных материалов можно сделать вывод о том, что проведенные исследования позволили впервые оценить площади надводной и подводной частей архипелага с помощью гипсографической и объемной кривых (рис. 3.11). Рис. 3.12 свидетельствует об исключительно больших уклонах на внешних границах Валаамского архипелага, особенно вдоль субмеридионального направления. Превышение над дном может составлять до 100 м.

Новейшие и современные тектонические движения вдоль краевой части Фенно-скандинавского щита наследуются по ранее сформировавшейся сети разломов или тектонических нарушений. Умеренная сейсмическая активность такого района, как острова Валаам [Свириденко, Светов, 2008], не является чем-то необычным, и может приводить к движениям крупных каменных глыб по крутым склонам подводных окраин о. Валаам, которые, вероятно, могут вызывать подводные шумы. Особое внимание было уделено самому крутому склону Валаамского архипелага, показанному на рис. 3.10 и 3.12а, с координатами – 61,358° с.ш. и 30,885° в.д. Он хорошо выражен на дневной поверхности в виде тектонического уступа, в его западной и юго-западной части обнаруживаются столбчато-призматические отдельности, указывающие на конвективные процессы в базальтовом расплаве [Свириденко, Светов, 2008; Чудов, 2017]. Здесь ясно прослеживается резкое изменение глубин и уклонов дна, которые на расстоянии первых ста метров составляют 14°. Это значение более чем в 70 раз превышает модальное значение для Ладожского озера [Науменко, 2013]. Начиная с глубины 45–55 м максимальный наклон резко увеличивается, достигая 60°, местами обнажены как субвулканические тела, так и вмещающие терригенные породы и выявляются скальные структуры практически без современных донных отложений.

Впервые проведенная видеотосъемка самого крутого склона о. Валаам выявила его морфометрические особенности и структуру пород, слагающих склон с признаками сейсмической активности территории (рис. 3.13). На трехмерном изображении подводного склона ниже бровки (глубины 40–45 м) обнаружены выпаханные борозды [Науменко, Гуживатый, Нестеров, Субетто, 2019], свидетельствующие о возможных движениях породы вдоль склона к его подошве. Действительно, на этом выпукло-вогнутом склоне можно наблюдать все факторы, способствующие формированию обвалов: склон с уклонами до 60° и горизонтальной протяженностью несколько сотен метров, слоистость и трещиноватость пород, которые могут сползать под действием силы тяжести при локальных землетрясениях по ложбинам стока. Сейсмообвалы могут локализоваться в зонах активных разломов.

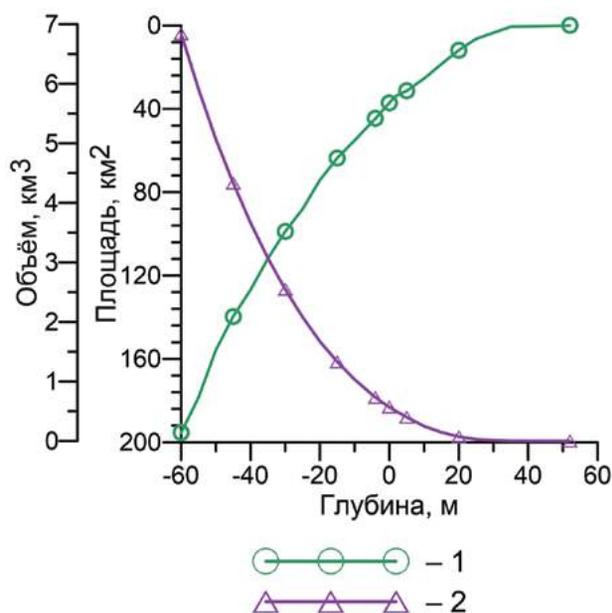


Рис. 3.11. Гипсометрическая (1) и объёмная (2) кривые Валаамского архипелага

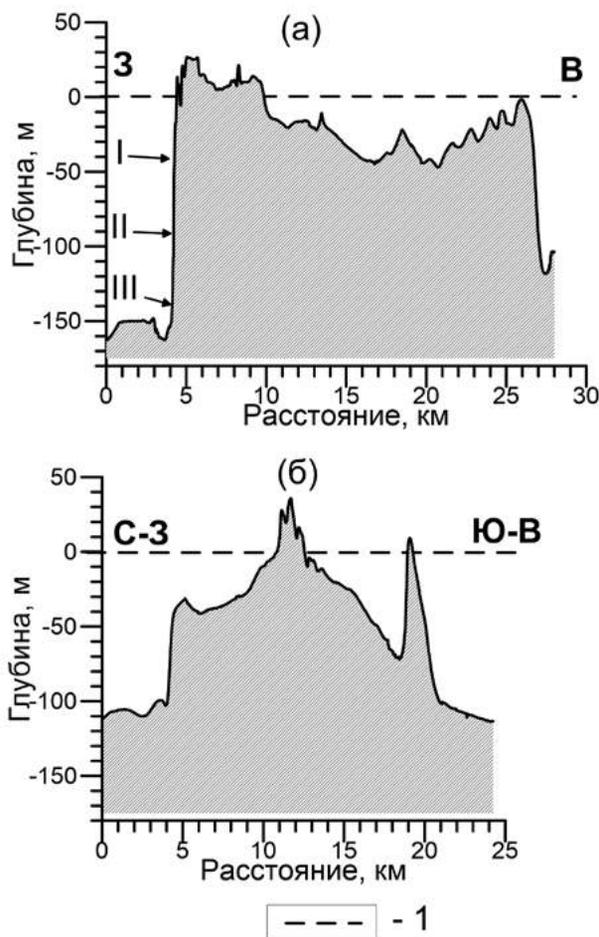


Рис. 3.12. Разрезы через Валаамский архипелаг – (а) и – (б); 1 – уровень Ладожского озера. Римские цифры I, II, III обозначают местоположение фотографий подводного склона о. Валаам

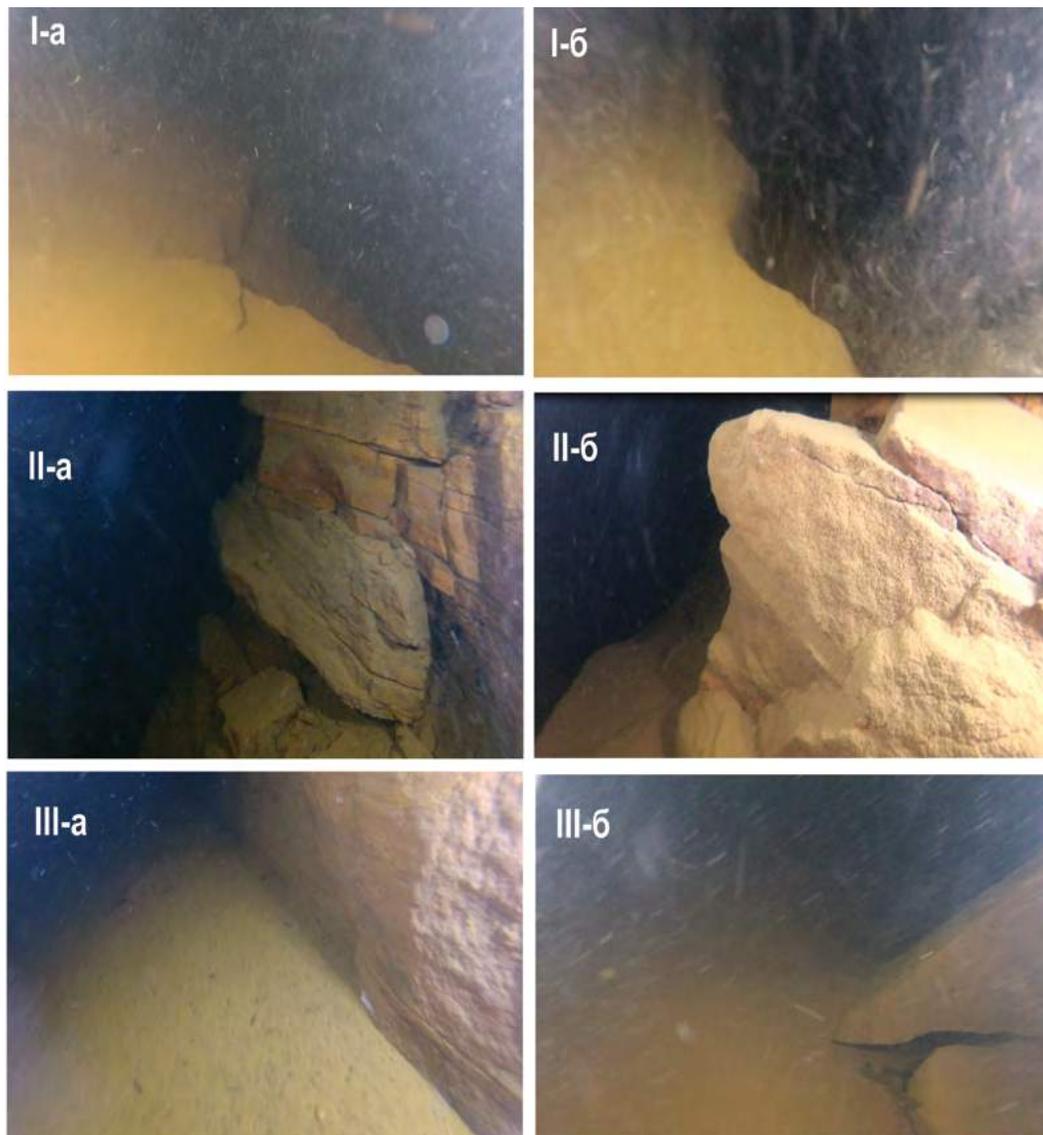


Рис. 3.13. Фотографии участков самого крутого подводного склона Валаамского архипелага, сделанные на разных глубинах и проходах, а и б: I-a, I-б – кромка на глубине 40 м перед подводным склоном, II-a, II-б – подводный склон на глубине 90 м, III-a, III-б – сочленение дна и подножия склона на глубине 147 м

Информация о землетрясениях, произошедших в районе Ладожского озера, приведена в работе [Ассиновская, Карпинский, 2020]. На подводных фотографиях отчетливо идентифицируются остроугольные края склона, что позволяет сделать вывод о происходивших здесь недавних землетрясениях и сейсмической активности территории. Ступенчатый продольный и поперечный профиль дна, полученный при эхолотных промерах, а также отвесные рассеченные многочисленными трещинами уступы берегов западной части о. Валаам указывают на влияние разрывных нарушений в этих районах [Анохин, Науменко, Нестеров, 2016; Слинченков, Константинов, Николаев, 1997; Pre-glacial and post-glacial..., 2021]. Таким образом, проведенные впервые специализированные морфометрические исследования Валаамского архипелага позволяют подтвердить и конкретизировать известные гипотезы о строении дна Ладожского озера.

Определение течений на поверхности Ладожского озера дистанционными методами. Важную роль для Ладожского озера играет циркуляция на его поверхности, от которой зависят перенос и трансформация вод притоков, распространение загрязняющих веществ, она определяет перераспределение химических элементов и формирует сток р. Невы. Однако *in situ* измерения течений в озере практически отсутствуют, связано это в первую очередь со значительными затратами на такие измерения.

Развитие мониторинга Земли из космоса способствовало разработке методик [An objective method for..., 1986], позволяющих проводить оценку поверхностных течений с помощью дистанционных методов, один из них, используемый в области распознавания образов – метод максимальной кросс-корреляции (МСС). Он применяется к последовательным спутниковым инфракрасным (ИК) снимкам температуры поверхности морей и океанов для обнаружения поверхностных потоков, связанных с видимыми структурами, движущимися по тепловым градиентам, где температура (SST) рассматривается как консервативный пассивный трассер. Существует множество улучшений этого метода [Doronzo, Taddei, Brandini, Fattorini, 2015]. Для условий Ладожского озера метод МСС прошел адаптацию и верификацию [Гузиватый, Науменко, 2020; Гузиватый, Науменко, 2021].

На основе разработанной методики и используя последовательные спутниковые ИК-изображения, построены схемы течений на поверхности Ладожского озера при различных ветровых ситуациях. На рис. 3.14 представлен пример поля векторов течений на поверхности Ладожского озера, сформированного под воздействием северного, северо-восточного ветра силой 1–4 м/с, действовавшего на акваторию в течение 12 часов и распределение температуры на поверхности 3 июля 2010 г. в 18 ч. 54 мин. Неоднородность поля ветра над озером привела к интенсификации течений вдоль восточного берега, вызывая дрейфовый перенос на юг на протяжении 180 км и шириной 30–40 км.

Для поиска векторов течений использовались космические снимки температуры поверхности воды разрешением 1,1 км с глобальной базы данных NASA Ocean Color (NASA Ocean Color).

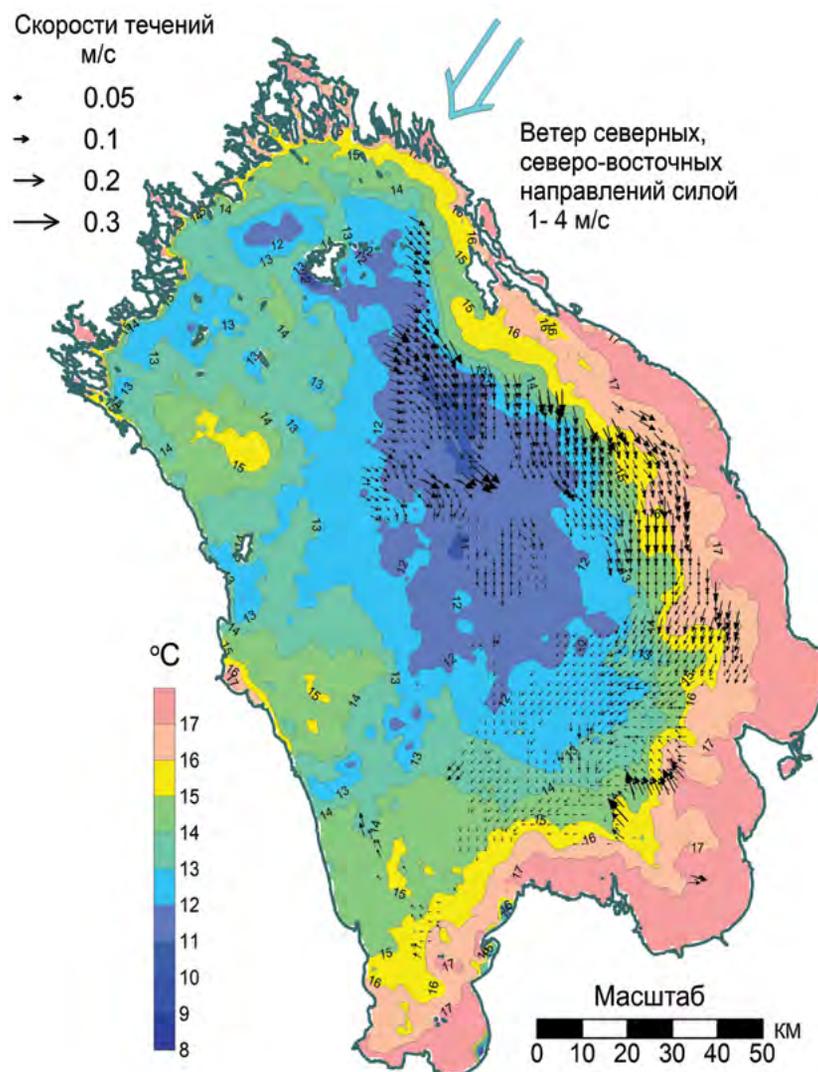


Рис. 3.14. Распределение температуры 3 июля 2010 года в 18 ч. 54 мин. и система циркуляции на поверхности Ладожского озера, сформированная под воздействием ветра северного, северо-восточного направления силой 1–4 м/с

Таким образом, адаптированный верифицированный для Ладожского озера метод адекватно реагирует на смену ветра перестройкой циркуляции по акватории. Это показывают схемы поверхностных течений при возникновении и эволюции апвеллинга у северо-восточного берега Ладожского озера при ветре северо-восточных и юго-западных составляющих, хорошо прослеживается связь между различными ветровыми ситуациями, поверхностными течениями в Ладожское озеро и эволюцией слоя скачка.

Определены основные черты поверхностных течений в весенний, летний и осенний периоды для Ладожского озера на основании расчетов методом МСС. Течения весеннего периода при слабых ветрах южных составляющих прослеживаются только в районе фронтального раздела, не распространяясь в центральную часть озера. В летний период роль ветра усиливается, и при его воздействии в течение нескольких дней происходит перестройка дрейфовых течений к виду циркуляций по всему Ладожскому озеру. Методика МСС, адаптированная для Ладожского озера, хорошо зарекомендовала себя для условий Онежского озера, Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей. Эти акватории расположены в различных климатических зонах и значительно отличаются друг от друга своими масштабами. Существенные пространственные различия в поле ветра над этими водоемами индуцируют совершенно уникальные циркуляции, которые крайне трудно выявить какими-либо ещё методами. Поля течений, рассчитанные по непрерывным сериям снимков для Балтийского моря и Ладожского озера, позволили оценить для этих разномасштабных акваторий изменчивость поверхностных течений за синоптический период. Циркуляция на поверхности крупных водоемов может быть оценена по последовательным спутниковым изображениям с использованием метода МСС. Этот подход является очень перспективным, поскольку у него есть возможности определения поверхностных течений в синоптическом масштабе на квазинепрерывной временной основе.

Глава 4

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ПРИТОКОВ

Одной из приоритетных научных задач современности является оценка состояния поверхностных вод как среды обитания гидробионтов в условиях меняющегося климата. Выявление особенностей и закономерностей формирования гидробиологического и гидрохимического режимов Ладожского озера, крупнейшего озера Европы и безальтернативного источника водоснабжения Санкт-Петербурга и населенных пунктов Северо-Запада России, а также его притоков под воздействием природных и антропогенных факторов динамики – одна из основных целей исследований Института озераедения РАН.

Такой огромный водоем, как Ладога, подразделяется на несколько районов, существенно различающихся по многим лимническим показателям. Батиметрия Ладожского 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 относительно мелководную части, между которыми расположены участки дна со средними глубинами. На юге озера находятся обширные относительно мелководные участки, охватывающие открытые прибрежные зоны и заливы, благодаря чему южная часть озера оказывается более тепловодной по сравнению с северной [Ладога, 2013]. Эти особенности определяют формирование гидрохимического и гидробиологического режимов водоемов.

Особенности протекания озерных процессов в этих районах определяются поступлением веществ с водосбора, происходящими в озере гидрологическими явлениями и функционированием озерной биоты. Одним из основных факторов, определяющих неоднородность лимнических процессов в разных частях акватории, является морфометрия озерной котловины. В связи с этим, на основе морфометрического районирования в Ладоге были выделены четыре лимнические зоны [Гусаков, Тержевик, 1992], имеющие характерные особенности по целому комплексу озерных характеристик, в том числе, гидрохимических и гидробиологических. Схема на рис. 4.1А построена на морфометрической модели М.А. Науменко [2013]. Каждая из этих зон вносит свой специфический вклад в функционирование экосистемы Ладоги в целом. Станции, на которых проводят свои исследования ИНОЗ РАН, расположены по акватории водоема таким образом (рис. 4.1), чтобы учесть особенности развития экосистемы озера в различных его зонах и, затем, сформировать общую картину состояния и эволюции водоема. Исследования основной акватории Ладожского озера проводятся на постоянной основе с использованием научно-исследовательских судов (рис. 4.2).

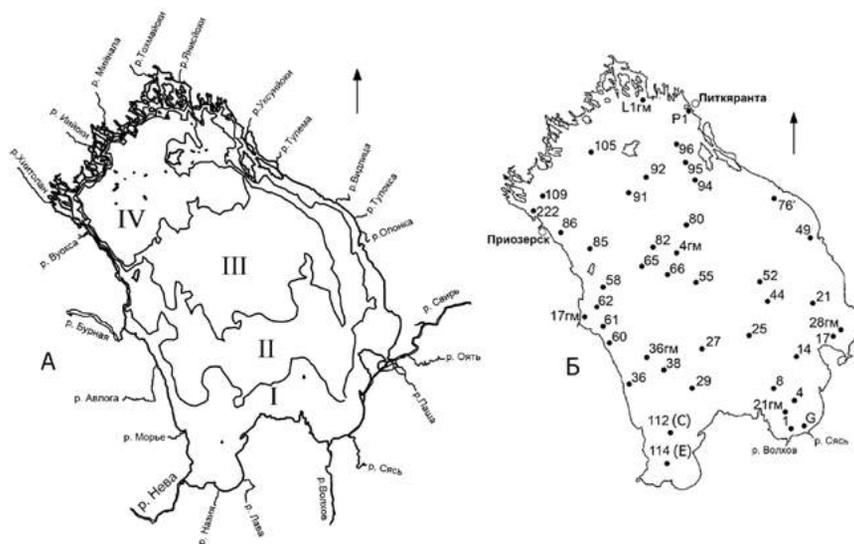


Рис. 4.1. Лимнические зоны Ладожского озера (I – Прибрежная; II – Деклинальная; III – Профундальная; IV – Ультрапрофундальная), его важнейшие притоки (А) и основные мониторинговые станции отбора проб (Б)

Антропогенная нагрузка на Ладожское озеро, выразившаяся в его загрязнении и эвтрофировании (особенно в 1970–1980-х гг.) привела к изменениям сообществ гидробионтов в озере и в целом всей его экосистемы. Снижение антропогенной нагрузки на озеро в середине и конце 1990-х гг. XX века вследствие уменьшения экономической активности в регионе отразилось на структуре и функционировании экосистемы Ладоги [Ладога, 2013].



Рис. 4.2. НИС «Посейдон» во время полевых исследований 2019 г.

В 1970-х и 1980-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 XX века и дестабилизация функционирования экосистемы [Антропогенное эвтрофирование Ладожского..., 2005], что было зафиксировано особенно наглядно по изменению мейобентоса открытой зоны Ладожского озера [Курашов, 2002; Экосистема Ладожского озера..., 2018].

Именно, начиная с конца 1970-х годов, и на протяжении 1980-х и 1990-х годов на Ладожском озере были проведены беспрецедентные по своей комплексности и охвату элементов экосистемы лимнологические исследования. Поскольку данная глава посвящена в основном гидробиологическим и гидрохимическим исследованиям Ладоги, мы кратко представим основные персоналии, благодаря трудам которых были получены крайне важные результаты, описывающие состояние и тенденции изменения крупнейшего европейского озера в конце XX века. Эти результаты были изложены в таких монографиях, как «Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера» [1982], «Современное состояние экосистемы Ладожского озера» [1987], «Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы» [1992], первая в мире монография по пресноводному мейобентосу «Мейобентос как компонент озерной экосистемы» [Курашов, 1994], «Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее» [2002], «Ладожское озеро. Атлас» [2002]. Результаты по гидрохимии были обеспечены работами: Б.Л. Гусакова, А.М. Крючкова, Е.А. Стравинской, Е.А. Юдина, Г.Ф. Расплетинной, Д.С. Ульяновой, Н.В. Игнатъевой, Т.М. Трегубовой, Т.П. Кулиш, Т.Н. Петровой, О.А. Черных, Н.Л. Крыленковой, О.М. Сусаревой, Г.Т. Фруминим, В.А. Щербак, Н.Н. Коркишко, Ю.В. Крыловой. Данные по гидробиологическим сообществам (фитопланктон, макрофиты, перифитон, бактериопланктон, водные грибы, зоопланктон, макрозообентос, мейозообентос) были получены в работах следующих научных сотрудников института: С.Е. Антонова, Д.Н. Александровой, Т.Н. Маслевцовой,

Изменения в биологических сообществах озера наиболее активно происходили, начиная с последней трети XX века, во многом, в результате воздействия антропогенного фактора. Однако, можно утверждать, что природные процессы будут продолжать оставаться определяющими в формировании и функционировании биоценозов озера. Это следует из того, что, являясь огромным глубоководным водоемом с весьма замедленным водообменом, Ладожское озеро по природе своей обладает высокой инертностью и устойчивостью к внешним воздействиям. Гомеостаз озерной экосистемы также поддерживается за счет внутренних структурных перестроек сообществ гидробионтов, что в целом приводит к достаточно стабильному состоянию озерной биоты. Характерные изменения сообществ гидробионтов под воздействием антропогенного фактора наиболее сильно проявляются в зонах, прилегающих к источникам повышенной антропогенной нагрузки [Литоральная зона Ладожского..., 2011]. В этих случаях характеристики развития сообществ гидробионтов могут выступать надежными критериями оценки экологического состояния водной среды.

Проводимые в Институте озерадения РАН исследования по оценке состояния биотической компоненты экосистемы Ладожского озера совместно с гидрохимическими характеристиками при воздействии природных и антропогенных факторов в условиях меняющегося климата по своей комплексности имеют мало аналогов среди лимнологических исследований во всем мире. Регулярному изучению в институте подлежат следующие сообщества гидробионтов Ладоги: фитопланктон, бактериопланктон, микопланктон, зоопланктон, макрозообентос, мейзообентос, высшая водная растительность, перифитон. К сожалению, не проводятся в настоящее время исследования микробентоса, протозойного планктона и рыбного населения.

Ниже представлены важнейшие достижения и общая картина комплексных исследований основных биологических сообществ Ладожского озера и его гидрохимии, а также гидрохимии и некоторых биологических характеристик притоков озера в XXI веке, полученные сотрудниками ИНОЗ РАН.

Гидрохимические и гидробиологические исследования на притоках Ладожского озера. В период с 2000 по 2004 гг. коллективом сотрудников института под руководством проф., д.б.н. И.С. Трифоновой проводились сезонные исследования притоков Ладожского озера. В работах участвовали к.б.н. В.П. Беляков, А.Л. Афанасьева, к.б.н. Е.С. Макарецца, к.б.н. О.А. Павлова, к.г.н. Г.Ф. Расплетина, к.б.н. А.Г. Рusanов, к.б.н. Е.В. Станиславская, к.г.н. Т.П. Кулиш, к.х.н. О.А. Черных, О.М. Сусарева, Т.Н. Петрова, В.А. Щербак. В результате проведенных работ были выявлены гидрохимические особенности и оценено состояние основных биологических сообществ 21 притока Ладоги и р. Невы (рис. 4.1А). Впервые проведен сравнительный анализ видового состава, структуры и биомассы фитопланктона, перифитона и зообентоса притоков Ладоги и р. Невы. Проанализировано влияние природных и антропогенных факторов на формирование структуры речных гидробиоценозов и их продуктивность. Был оценен трофический статус рек, их сапробиологическое состояние и значение отдельных сообществ и биотических индексов для биоиндикации экологического состояния рек. По материалам проведенных исследований была опубликована монография «Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов» [Оценка экологического состояния..., 2006].

В дальнейшем данные исследования были продолжены в рамках тематических планов ИНОЗ РАН на 23 притоках, где наиболее полно оценивались гидрохимические характеристики притоков Ладоги. Важнейшие результаты, полученные по этому направлению, были обеспечены работами Т.Н. Петровой, М.А. Гусевой, Е.С. Панковой, В.А. Щербак, Т.М. Дорогиной, Л.И. Суворовой, В.Ю. Крыловой (Шмаковой). В результате проведенных наблюдений за гидрохимическим режимом рек Ладожского водосбора в условиях воздействия природных и антропогенных факторов было выявлено, что минерализация воды в большинстве рек не превышает 50–60 мг/л. Как было показано в предыдущие периоды наблюдений, р. Нева и притоки Ладожского озера в основном характеризуются преобладанием гидрокарбонат-иона в анионном составе и имеют смешанный катионный состав (преобладают кальций и магний). Реки Бурная и Вуокса характеризуются более высокими концентрациями сульфатов и суммы ионов натрия и калия, что отличает их от большей части притоков Ладожского озера. Эти отличия обусловлены в первую очередь природными условиями формирования ионного состава р. Бурной, а не антропогенным воздействием. Также повышенные относительные значения содержания сульфат-ионов и хлорид-ионов отмечены в р. Уксун.

Относительное содержание кислорода, в целом, во всех притоках и Ладожского озера и в р. Неве не достигает ста процентов, что говорит о значительном преобладании процессов деструкции. При этом, иногда в ряде притоков, (в основном это рр. Волхов, Назия, Тулема, Паша и Сясь), значение концентрации кислорода в летний период может опускаться ниже порога допустимой концентрации для объектов рыбохозяйственного назначения.

Показано, что р. Волхов является главным источником поступления фосфора в озеро с водосбора. В целом за последние 5 лет наметился тренд снижения концентрации этого элемента в воде реки. Еще два основных притока озера (рр. Свирь и Бурная с Вуоксой) и реки северной и северо-восточной частей водосбора – Янис, Тулема, Видлица отличаются наиболее низким содержанием фосфора в воде. Содержание фосфора в реках восточного побережья озера достаточно постоянно в многолетнем ряду с определенными природными сезонными колебаниями. Среди малых рек южной части водосбора, в которых содержание фосфора всегда наиболее высокое, обычно еще более высокими концентрациями в результате сбросов хозяйственно-бытовых сточных вод выделяется р. Авлога. Однако, за многолетний период наблюдений видна тенденция к снижению фосфорной нагрузки на эту реку. В 2022 г. содержание общего фосфора в этой реке было невысоким, ниже, чем в 2020–2021 гг. В истоке Невы содержание общего фосфора обычно близко к содержанию в прибрежной зоне озера, в бухте Петрокрепость. В 2022 г. содержание общего фосфора в истоке р. Невы практически не изменилось в течение всего периода наблюдений и осталось на уровне значений предыдущих лет.

Доля неорганического фосфора от его общего содержания обычно изменяется в широких пределах от 10 до 80 % и более. В реках озерного питания – рр. Свирь, Бурная, Янис, в северо-восточных притоках и в истоке р. Невы в 2022 г., как и в последние годы, часто наблюдается снижение концентрации ниже предела аналитического обнаружения. В большинстве притоков содержание неорганического фосфора в последние годы оставалось в пределах многолетних значений.

Показатели, характеризующие содержание органического вещества в воде всех обследованных рек, находятся в пределах многолетнего диапазона изменений. Экстремальных значений, которые могли бы быть связаны с высоким антропогенным воздействием на них, не наблюдалось. Содержание взвешенных веществ в воде притоков озера и в истоке р. Невы в 2022 г. соответствовали наблюдаемым за многолетний период и характеризуют природные условия водосбора.

Экстремальных уровней концентраций нефтяных углеводородов (НУВ) в воде притоков Ладоги и р. Невы в последнее десятилетие не было обнаружено. Несмотря на отсутствие зафиксированных экстремальных уровней концентраций НУВ, характер их сезонного распределения в воде как главных, так и остальных притоков, свидетельствует о наличии определенного фона антропогенного воздействия, особенно в зимне-весенний период, когда осуществляются промышленные сбросы и смыв НУВ с водосбора.

Из биологических сообществ притоков наиболее детально исследован зоопланктон [The role of environmental factors..., 2017; Алешина, Курашов, Гусева, Петрова, 2022]. Был изучен состав, количественное развитие зоопланктона и физико-химические характеристики воды в 19 притоках Ладожского озера и истоке р. Невы. Выявлено 137 таксонов зоопланктеров рангом ниже рода, из них Rotifera – 56 видов и подвидов (40,9 %), Cladocera – 57 (41,6 %), Copepoda – 24 (17,5 %). Показано, что количественные показатели зоопланктона в реках сильно варьируют, но средние значения численности и биомассы низки (30–9580 экз/м³ и 0,17–266,2 мг/м³). В притоках озера в весенний период доминируют представители групп Copepoda и Rotifera, в летний – Cladocera, в осенний – Cladocera и Copepoda. Показано, что развитие отдельных видов зоопланктона групп Copepoda, Cladocera и Rotifera в реках-притоках Ладожского озера носит стохастический характер. Состав и количественное развитие видов не удается связать с какими-либо факторами окружающей среды или их комбинацией. На основе состава и численности отдельных видов зоопланктона невозможно выделить группы сходных притоков Ладожского озера по развитию зоопланктона. Группы сходных рек выделялись в соответствии с их физико-географическим положением. В тоже время суммарные показатели численности Copepoda, Cladocera и Rotifera в притоках Ладожского озера закономерно связаны с определенными комбинациями оцененных физико-географических характеристик и факторов водной среды, что было подтверждено возможностью построения высокозначимых регрессионных моделей, описывающих численность групп в зависимости от определенного комплекса переменных. Показано, что физико-географические интегральные факторы, такие, как площадь

водосбора, расход воды и озерность являются наиболее существенными для формирования уровня количественного развития групп Copepoda, Rotifera и Cladocera в притоках Ладожского озера.

Гидрохимические исследования Ладожского озера. Как и при изучении притоков, основной вклад в изучение гидрохимического режима Ладожского озера в последние годы был внесен следующими сотрудниками ИНОЗ РАН: Т.Н. Петровой, М.А. Гусевой, Е.С. Панковой, В.А. Щербак, Т.М. Дорогиной, Л.И. Суворовой, В.Ю. Крыловой (Шмаковой). В результате этих работ были получены новые натурные данные по гидрохимическим параметрам озерной экосистемы Ладоги, дающие дополнительную информацию для формирования выводов о современном состоянии озера в условиях воздействия природных и антропогенных факторов.

Было показано, что средняя минерализация основной массы Ладожского озера за последние 60 лет изменялась в достаточно широких пределах от 55,6 до 71,6 мг л⁻¹. При этом отмечается тенденция её роста. В последнее десятилетие 2009–2022 рост минерализации основной водной массы происходит преимущественно за счёт роста абсолютной и относительной концентрации HCO₃⁻. В последние десятилетия наблюдаются постепенное снижение показателя рН и уменьшение неоднородности его распределения в озере. Исследования 2021–2022 гг. подтвердили эту тенденцию. В летний период 2022 г. значения водородного показателя также не превышали 7,84, в Сортавальском заливе значения рН опускаются до 6,5 вследствие преобладания деструкционных процессов.

Величина относительного содержания растворенного кислорода в августе 2022 г. лишь на нескольких станциях северной и восточной части озера, а также в бухте Петрокрепость, превышает 100 %. В летний и весенний периоды увеличение относительного содержания кислорода, как правило, свидетельствует о фотосинтетической активности. В 2022 г., вероятно, увеличение продуцируемого автотонного органического вещества в сочетании с повышенной температурой привело к ускорению начальных скоростей его деструкции и быстрому расходованию кислорода на минерализацию.

В летние месяцы в озере в последние годы величина относительного содержания растворенного кислорода иногда аномально повышается (> 100 % насыщения) по сравнению со средними значениями за период 2003–2013 гг. Причем повышенные концентрации наблюдались не только в поверхностном, но и в отдельных случаях в придонном слое воды, что необычно. По-видимому, увеличение относительного содержания кислорода свидетельствует о росте фотосинтетической активности в озере. Во всех обследованных частях Ладожского озера концентрация кислорода, как правило, не опускается ниже порога концентрации для объектов рыбохозяйственного назначения (6 мг л⁻¹), за исключением некоторых локальных зон прямого антропогенного воздействия (г. Питкяранта, Сортавальские шхеры).

Достаточно долго низкие значения средней за период открытой воды концентрации общего фосфора не превышали допустимое для озера значение (15 мкг Р л⁻¹). Однако в последние два года (2021–2022) произошло ее заметное увеличение, и средняя концентрация достигла 18–20 мкг Р л⁻¹, превысив допустимое значение. Концентрации общего фосфора выросли во всех лимнических зонах водоема, но особенно сильно они увеличились в воде глубоководных зон, которые составляют основную водную массу озера. Это обстоятельство вызывает некоторую тревогу и может указывать на усиление эвтрофирования озера. Несмотря на увеличение концентрации общего фосфора во всех лимнических зонах, основные характерные черты его пространственного распространения в воде озера соответствуют особенностям многолетнего распределения. Данные многолетнего наблюдения за содержанием минерального фосфора в воде Ладожского озера показывают отчетливый тренд снижения средних за период открытой воды концентраций. В результате интенсивного летнего и частично осеннего потребления по всему столбу воды не только в мелководных, но и в глубоководных зонах среднее содержание его после 2013 г. не превышало 2 мкг Р л⁻¹. В пространственном распределении в водоеме неорганического фосфора основную роль играет его потребление биотой. В августе 2022 г. количество минерального фосфора оказалось ниже предела обнаружения практически во всех отобранных пробах воды, как по вертикали, так и по акватории. Такие ситуации начали периодически наблюдаться в озере начиная с 2010 г. Таким образом, после 2010 г. наметились изменения в режиме минерального фосфора, связанные с его более интенсивным потреблением биотой. Таким образом, низкое содержание минерального фосфора указывает на ситуацию, что в настоящее время он лимитирует интенсивно развивающуюся биоту, и его активное потребление фито- и бактериопланктоном, очевидно, может вести к повышению продуктивности озера.

Цветность воды основной водной массы озера достаточно консервативный показатель, который очень незначительно колеблется в многолетнем ряду. В прибрежной и деклинальной зонах влияние вод притоков может приводить в некоторых случаях к определенному увеличению цветности воды на отдельных участках этих зон.

Заметные изменения среднегодовых концентраций общего и лабильного органического углерода в водоеме при многолетнем ряде наблюдений свидетельствуют о дисбалансе продукционно-деструкционных процессов. Значительные межгодовые изменения средних концентраций общего органического углерода (ТОС) в воде Ладожского озера начали происходить с 1981 г. и продолжают по настоящее время. Начиная с 2020 г., средние за период открытой воды концентрации лабильного углерода постепенно увеличиваются, что также свидетельствует об интенсификации первичного продуцирования и увеличении внеклеточной продукции водорослей. В характере распределения взвешенных веществ по акватории в последние годы не наблюдается принципиальных отличий по сравнению с предыдущими годами.

Летние исследования содержания НУВ подтвердили тенденцию роста их концентрации в воде озера в течение ряда последних лет, отмеченную во всех лимнических зонах, включая глубоководные, что, как и отмеченные выше, характеристики косвенно указывают на увеличение уровня первичного продуцирования в водных массах озера.

Гидробиологические исследования Ладожского озера. Основной вклад в изучение отдельных сообществ гидробионтов в Ладожском озере в XXI веке в рамках комплексных исследований биотической компоненты экосистемы озера под руководством проф., д.б.н. Драбковой Валентины Гавриловны (до 2008 г.) и проф., д.б.н. Курашова Евгения Александровича (с 2009 г. до настоящего времени) внесли следующие сотрудники Института в рамках выполнения государственных тем исследований: [д.б.н. И.Н. Андроникова](#), [к.б.н. Г.И. Летанская](#), д.б.н. Т.Д. Слепухина, [д.б.н., проф. Л.А. Кудерский](#), [д.б.н. Н.А. Петрова](#), к.б.н. В.А. Авинский, к.б.н. В.А. Барков, к.б.н. А.Г. Русанов, к.б.н. М.А. Рычкова, к.б.н. Л.Л. Капустина, к.б.н. З.Г. Каурова, к.б.н. М.А. Барбашова, к.б.н. Д.С. Дудакова, к.б.н. Л.Л. Ширенко, к.б.н. Г.Г. Митрукова, Е.В. Протопопова, [Н.В. Родионова](#), И.В. Иофина, С.А. Малявин, М.С. Трифонова, Д.Г. Алешина, А.К. Ляховская, А.Д. Старухина. В результате проведенных работ были получены чрезвычайно важные научные данные, касающиеся развития и изменения под воздействием природных и антропогенных факторов всех основных биологических сообществ Ладожского озера. Ниже мы кратко приведем основные результаты их изучения, полученные именно в последние годы. Более с подробной информацией можно ознакомиться в публикациях [Экосистема Ладожского озера..., 2018; Современное состояние и проблемы..., 2021].

Открытая часть озера. Фитопланктон. Исследования фитопланктона открытых районов озера за пределами литоральной зоны в последние годы показали, что усредненные для озера величины биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла-а укладываются в пределы многолетних колебаний этих параметров для летнего периода. Величины биомассы и хлорофилла-а позволяют охарактеризовать Ладожское озеро в летний период как мезотрофный водоем. Отмечаемые в настоящее время в осенний период средние для озера значения биомассы ($1,07 \pm 0,21$ мг/л) и хлорофилла-а ($2,99 \pm 0,50$ мкг/л) находятся на нижней границе мезотрофии. По ГОСТу 2874, по показателю численности водорослей воды Ладожского озера относятся к 1–2 классу качества воды.

Бактериопланктон. Оценка динамики средневзвешенных величин общей численности бактериопланктона, рассчитанных для всего озера, показала тенденцию возрастания величин общей численности бактериопланктона, начиная с 2000 г. В последние 5 лет наиболее высокие средние концентрации микроорганизмов в эпилимнионе отмечались в прибрежном районе, а минимальные – в профундальном. В августе 2022 г. пространственное распределение бактериопланктона в эпилимнионе озера было достаточно равномерным без резких превышений численности бактерий в каком-либо из районов. Судя по величинам общей численности микроорганизмов, Ладожское озеро является слабо мезотрофным водоемом с чертами олиготрофии в гипolimнионе глубоководных районов.

Микопланктон. Исследования микопланктона выявили непостоянство его качественного состава в последние годы. В частности, сильные колебания численности дрожжевых организмов, перерас-

пределение количественного состава микопланктона по акватории озера. Также изменчивы показатели и его количественного развития. Очевидно, что особенности качественного состава водных грибов и количественное развитие этого сообщества вторичным образом связано с особенностями продуцирования органического вещества в озере и с динамикой других планктонных сообществ.

Зоопланктон. Данные по зоопланктону открытой акватории Ладоги свидетельствуют о выровненности и стабильности сообщества зоопланктона в эпилимнионе склонового и глубоководного районов. Вместе со среднемноголетними значениями развития сообщества полученные результаты указывают на олиготрофный статус этих участков. При исследованиях зоопланктона в прибрежной зоне южной части озера были зарегистрированы очень низкие показатели развития сообщества. Например, в Волховской губе численность изменялась от 0,3 до 27,8 тыс. экз./м³ (в среднем $13,7 \pm 4,5$ тыс. экз./м³), биомасса от 0,01 до 0,62 г/м³ (в среднем $0,13 \pm 0,08$ г/м³). В предыдущие годы биомасса летнего зоопланктона здесь, как правило, превышала 0,5 г/м³, достигая величин 2 и более г/м³. Такой низкий уровень развития зоопланктона, возможно, связан с подавлением воспроизводства планктонных беспозвоночных загрязнителями, поступающими с водами рек Волхов и Сясь, на водосборах которых ведется активная хозяйственная деятельность. Мелководный и прибрежный районы бухты Петрокрепость и Волховской губы по показателям зоопланктона относятся к мезотрофному типу.

Макрозообентос. Изучения макрозообентоса последних лет показали, что в открытых районах озера на исследованных станциях видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп остаются достаточно стабильными. Изменения видовой состава макрозообентоса и количественные показатели находятся в пределах незначительных межгодовых колебаний. Наблюдаемые вариации обусловлены особенностями донных отложений конкретных биотопов. Для пространственного распределения зообентоса в открытых районах озера по-прежнему характерны следующие особенности – с увеличением глубины снижается видовое разнообразие, упрощается структура донных биоценозов, в составе которых увеличивается доля малошестинковых червей. Макрозообентос южной части озера характеризуется высокой пространственной и временной изменчивостью как видовой состава и структуры донных сообществ, так и их количественных характеристик. Байкальский вселенец *Micruropus possolskii* продолжает активно осваивать акваторию бухты Петрокрепость. В настоящее время этот бокоплав играет существенную роль в донных сообществах не только на литоральных участках, но и в центральной части залива. Отмечена тенденция увеличения средних значений биомассы в северной глубоководной зоне и их снижения в южной части озера. Небольшой уровень развития зообентоса на глубинах 18–50 м связан с уменьшением доли реликтовых амфипод в составе донных биоценозов. Также в последние годы отмечается тенденция снижения количественных показателей развития донных макробеспозвоночных в южных районах озера, особенно в Волховской губе. Факт значительного снижения биомассы макрозообентоса в Волховской губе, одной из самых продуктивных зон озера, с 60-х годов прошлого века до настоящего времени вызывает определенное опасение. Подобное снижение количества, а возможно, и трофического качества донных беспозвоночных, вероятно, в результате воздействия загрязнителей, не могло не сказаться на падении уловов и развитии токсикозов у рыб Волховской губы [Воспроизводство рыб и беспозвоночных..., 2020]. Аналогичная, но менее выраженная тенденция наблюдается и в губе Петрокрепость. Эта же тенденция просматривается и для всей южной Ладоги.

Мейозообентос. Оценка изменений структуры и продукционных характеристик сообщества мейозообентоса на прибрежных и глубоководных станциях за период с 2007 г. по настоящее время показала отсутствие нарушений и стабильное функционирование донных сообществ. Уровень количественного развития мейозообентоса (особенно в профундальной и ультрапрофундальной зонах) стал близок к тому, который был характерен для олиготрофного периода экологического состояния озера. Наблюдения за динамикой изменения структуры мейозообентосного сообщества в центральной акватории озера за последнее десятилетие показали тенденцию улучшения состояния экосистемы озера, что выявляется исчезновением скоплений диапаузирующих циклопов. Начиная с 2017–2018 гг., отмечено значительное снижение количественных показателей и обеднение таксономического состава мейозообентоса по сравнению с предыдущими годами, что особенно сильно проявилось для станций прибрежной и деклинальной зон Ладожского озера. Возможно, это связано с избыточным выеданием мейозообентоса макрозообентосом. Лишь в профундальной зоне численность и биомасса не имеют существенных различий за последние 10 лет. Начиная с 2007 г., здесь наблюдаются стабильно невысокие

численность и биомасса по сравнению с предыдущим периодом, когда на дне отмечались скопления диапаузирующих циклопов. Подробно характер изменения мейобентоса и его роль в индикации экологического состояния озера описаны в работе [Экосистема Ладожского озера..., 2018]. По результатам проведенных в последние годы работ было выявлено, что в целом нарушений экологического состояния открытых акваторий Ладоги в связи с антропогенным влиянием не обнаружено.

Литоральная зона. В крупнейшем Европейском озере Ладожском на литоральную зону приходится около 15 % площади водоема и 1,3 % объема воды. Тем не менее, общее биоразнообразие водоема во многом формируется за счет литоральной зоны. Для нее характерны наибольшие количественные показатели сообществ гидробионтов. Литораль – место нереста всех видов рыб, обитающих в озере, и место нагула многих из них. Это место гнездования большого числа видов птиц. Велико социально-экономическое значение литоральной зоны: промышленное и любительское рыболовство, водопотребление, рекреационное использование.

Будучи наиболее динамичной частью экосистемы Ладожского озера, литоральная зона неизбежно претерпевает определенные изменения. На современном этапе наибольшее значение имеют следующие пути трансформации литоральной зоны Ладожского озера: 1) естественные природные изменения (климатические факторы, колебания уровня); 2) антропогенные: загрязнение, эвтрофирование, механическое воздействие; 3) биологическая трансформация (биоинвазии).

В XX веке исследования литоральной зоны Ладожского озера, прежде всего, связаны с работами, в которых участвовал и которыми руководил выдающийся гидробиолог и лимнолог д.б.н. Игорь Михайлович Распопов (1927–2011). Итоги работ 1990-х гг. были опубликованы в книге «Прибрежно-водные экотоны больших озер» [1998] и других изданиях, в том числе в высокорейтинговых международных публикациях [Littoral zone of Lake..., 1996; Invertebrate communities associated..., 1996]. В дальнейшем комплексные исследования литоральной зоны Ладожского озера были продолжены под руководством проф., д.б.н. Евгения Александровича Курашова. На различных этапах этих работ активное участие принимали/принимают сотрудники ИНОЗ РАН: [д.б.н. И.М. Распопов], [д.б.н. И.Н. Андроникова], к.г.н. Н.В. Игнатъева, [О.М. Сусарева], к.б.н. А.Г. Русанов, Е.В. Протопопова, М.А. Рычкова, к.б.н. Л.Л. Капустина, [Н.В. Родионова], к.б.н. М.А. Барбашова, М.С. Трифонова, к.б.н. Д.С. Дудакова, к.б.н. Д.В. Барков, к.б.н. Л.Л. Ширенко, к.б.н. В.А. Авинский, к.б.н. Г.Г. Митрукова, С.А. Малявин, Д.Г. Алешина, М.О. Дудаков, А.К. Ляховская, А.Д. Старухина.

В результате этих исследований была опубликована монография «Литоральная зона Ладожского озера» [2011], в которой представлены морфометрические, гидрологические и гидрохимические характеристики литоральной зоны Ладоги. Описана высшая водная растительность озера и особенности ее пространственного распределения. Представлены качественные и количественные оценки развития в литоральной зоне фитопланктона, перифитона, зоопланктона, макрофауны, мейобентоса. Проанализированы факторы, влияющие на состав и количественное развитие биологических сообществ. Большое внимание уделено экологии, биологии и роли видов-вселенцев в литоральной зоне озера. Показано, что на современном этапе биоинвазии являются существенным фактором трансформации экосистемы Ладоги.

Информативная и индикаторная роль литоральной зоны в выявлении участков наибольшего антропогенного нарушения, или так называемых «горячих точек», в пределах водоема, бесспорна. Исследования литоральной зоны дают первую информацию о неблагоприятных экологических ситуациях, прежде всего в районах, приближенных к источникам загрязнения. Одна из важнейших задач исследований заключается в том, чтобы определить интенсивность распространения загрязняющих веществ в сторону открытого озера, негативное влияние на прилегающие акватории, а также их площади. На основании проведенных исследований выявлены зоны экологического риска, где комплекс факторов может оказывать или оказывает неблагоприятное влияние на прибрежные биоценозы и несет угрозу для основной акватории озера. Наблюдения в этих зонах показали, что после прекращения сброса сточных вод промышленных предприятий биологические системы могут вновь сформироваться и восстановить свое функционирование, но, конечно, на определенном новом уровне. Временные периоды этого процесса различны. Наиболее четкие ответные реакции на длительное техногенное воздействие проявляются в зооценозах – зоопланктоне и зообентосе.

Исследования, проведенные ИНОЗ РАН в литоральной зоне Ладожского озера в последние десятилетия (2006, 2010, 2014, 2019) на постоянных мониторинговых точках по всему озеру (рис. 4.3, 4.4, 4.5) позволили выявить основные характеристики развития литоральных сообществ в динамике их многолетних изменений. Следует отметить, что литоральный рейс 2014 г. смог состояться благодаря финансированию СПбГУ в рамках выполнения проекта НИР 18.38.85.2012 «Изучение состава низкомолекулярных органических веществ водных растений различных географических регионов и их роли в экосистемах» (руководитель – к.г.н., доцент Ю.В. Крылова). Работы в 2006, 2010 и 2014 гг. проводились на экспедиционном катере «Святая Надежда» (капитан Евгений Васильевич Румянцев) (рис. 4.5А). А литоральный рейс 2019 г. проводился в тесном сотрудничестве трех организаций ИНОЗ РАН, СПб филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С.Берга») и Управления ветеринарии Ленинградской области на НИС «Посейдон» (рис. 4.2).

В ходе исследований макрофитов Ладоги показано, что умеренное снижение уровня воды в Ладожском озере сопровождается активизацией процессов зарастания литорали. Благоприятное влияние снижения уровня воды на развитие и распространение низкотравных гелофитов и укореняющихся гидрофитов с плавающими листьями является характерной чертой в многолетней динамике макрофитных сообществ озер. При снижении уровня воды увеличивается вклад второстепенных видов в зарастание литорали, что приводит к смешиванию растительных группировок и, как следствие, подъему синтаксономического разнообразия. Вызванное подъемом уровня воды затопление почвы (в годы с высоким уровнем воды) приводит к интенсификации процессов минерализации терригенного органического вещества, способствуя обогащению воды биогенными веществами. Вследствие этого, в многоводные годы наблюдалось увеличение продуктивности ценозов погруженных и плавающих гидрофитов, являющихся индикаторами эвтрофирования. Показано также, что низкомолекулярный метаболит водных макрофитов может быть надежным индикатором стабильности озерной среды (подробнее в главе 9).



Рис. 4.4. Исследования литоральной зоны в 2006 г.

А – отбор проб в районе Питкярантского ЦБК (д.б.н. Е.А. Курашов и к.б.н. В.А. Авинский);
 Б – отбор фауны зарослей при помощи пробоотборника Панова-Павлова (д.б.н. Евгений Курашов и аспирант Д.В. Барков); В – к.б.н. А.Г. Русанов с отобранной пробой тростника



Рис. 4.5. А, Б – литоральные исследования 2014 г. (А – экспедиционный катер «Святая Надежда»; аспирантка М.С. Трифонова с отобранной пробой макрофауны); В, Г, Д – литоральные исследования 2019 г. (В – отбор проб макрофауны; Г – к.б.н. А.Г. Русанов отбирает пробы макрофитов; Д – д.б.н. Е.А. Курашов измеряет параметры водной среды на литорали многопараметрическим зондом AquaTroll-500); Е – д.б.н. Е.А. Курашов отбирает пробы в Щучьем заливе (5 мая 2023 г.)

Исследования перифитона Ладоги показали, что использование в мониторинге сообщества диатомовых водорослей может оказаться более надежным в оценке воздействия факторов (включая антропогенные), чем сообщество макрофитов. На основании исследований перифитона все обследованные участки литоральной зоны были классифицированы в соответствии с их трофическим статусом от олиготрофного до гиперэвтрофного. Большинство обследованных участков относится к мезотрофному типу. Анализ относительной роли факторов среды в регуляции видовой структуры диатомовых

водорослей перифитона выявил неравноценное значение экологических групп диатомовых водорослей в оценке качества воды. Видовая структура низкорослых и высокорослых диатомовых водорослей наиболее сильно зависела от показателя общего фосфора, характеризуя виды этих двух групп как наиболее надежные индикаторы степени эвтрофирования литорали Ладожского озера.

Исследования фитопланктона литоральной зоны озера выявили стабильность литорального фитопланктона Ладожского озера в течение последних 15 лет. Учитывая полученные значения показателей развития фитопланктона в летний период в исследованных литоральных биоценозах озера (включая Щучий з-в), можно говорить о мезотрофном характере водных масс литорали озера. По сапробиологическому анализу альгоценозов почти все исследованные станции литорали входили в бета-мезосапробную зону. По шкале трофности район открытых берегов можно охарактеризовать как слабomezотрофный, а все остальные районы Ладожского озера, как и в конце 1990-х – первое десятилетие 2000-х, как мезотрофные.

Показано, что по средним, за период наблюдений, величинам общей численности бактериопланктона (ОЧБ) трофический статус большей части исследованной литорали является типично мезотрофным. Некоторые участки литорали имеют мезотрофно-эвтрофный статус. Показано, что развитие бактериопланктона в литоральной зоне статистически достоверно было более интенсивным в «теплые годы» (2010, 2014) по сравнению с более «холодными» (2010, 2019). На основании средних по районам величин количественных соотношений сапрофитных бактерий и ОЧБ в 2019 г., установлено, что водные массы всех литоральных районов относятся к условным категориям «чистые» и «особо чистые» воды [Митрукова, Капустина, Курашов, 2020].

Анализ межгодовой динамики состава и количественного развития зоопланктона в одних и тех же литоральных биотопах показал, что состав и доминирующий комплекс зоопланктонного сообщества может значительно изменяться по годам. Например, в 2006 г. по численности в ряде исследованных литоральных биотопах преобладали коловратки, а в 2014 г. – веслоногие рачки. В целом, по результатам изучения всей литоральной зоны Ладоги в различные годы, можно заключить, что на всей обследованной литорали, кроме залива Рауталахти, из всех групп зоопланктона кладоцеры вносят основной вклад в биомассу зоопланктона. Исследования зоопланктона Щучьего залива выявили присутствие в заливе вида-вселенца – коловратки *Kellicotia bostoniensis*, которая ранее не была отмечена в этом районе. Данный вид постепенно распространяется в Ладожском озере и сосуществует с родственной аборигенной коловраткой *Kellicotia longispina*.

В 2013–2022 гг. проведенные исследования бентоса литоральной зоны во всех районах Ладожского озера позволили дополнить знания о сезонной, суточной динамиках и пространственном распределении зообентоса. Результаты исследования донных биоценозов показали, что пространственное распределение и количественное развитие макро- и мейзообентоса на различных биотопах отличались значительной вариабельностью, что объясняется высокой степенью гетерогенности литоральной зоны, связанной, в том числе, с типами растительных ассоциаций.

На основании комплексных исследований литоральной зоны выявлено, что основными зонами экологического риска являются: литораль п-ва Рауталахти; литоральная зона у г. Питкяранты; акватория у г. Приозерск, устье р. Вуоксы; Щучий залив; акватория у мыса Осиновец; Тайполовский залив; акватории вблизи п. Назия и п. им. Морозова.

Исследования, проведенные в литоральной зоне озера, показали, что биологические инвазии являются одной из главных составляющих процесса современной эволюции экосистемы водоема. В пределах литоральной зоны, как наиболее динамичной и продуктивной части озера, чужеродные виды играют большое значение. Наибольшую роль в трансформации экосистемы озера играют, прежде всего, ракообразные, среди которых первое место принадлежит амфиподам [Современное состояние и проблемы..., 2021]. В литоральной зоне Ладожского озера к настоящему времени зарегистрировано 4 вида инвазивных амфипод. Из них 2 вида байкальского происхождения – *Gmelinoides fasciatus* Stebbing, 1899 и *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 и 2 вида понто-каспийского происхождения – *Pontogammarus robustoides* (Sars, 1894) и *Chelicorophium curvispinum* (Sars, 1895). *G. fasciatus* проник в Ладожское озеро в 80-е годы XX века после преднамеренной интродукции в озера Карельского перешейка [Рапов, 1996]. Вид стал доминирующим компонентом бентоса во всех типах литоральных биотопов и привел к значительной трансформации экосистемы литорали [Invasive amphipods as a factor..., 2012]. *M. possolskii*, вероятнее всего, был случайно интродуцирован

в бассейн Ладожского озера вместе с *G. fasciatus*. Впервые вид был зарегистрирован в Щучьем заливе в 2003 г. [Barbashova, Malavin, Kurashov, 2013].

Наибольшее значение из неаборигенных видов по экологической роли в озере имеет байкальская амфипода *G. fasciatus*. После вселения байкальского вида кардинальным образом изменилась структура сообществ бентоса литорали, во многих из которых в настоящее время доминирует *G. fasciatus*. Исходный характерный вид литоральных биотопов в Ладоги утрачен навсегда. В настоящее время сформировались местообитания с биоценозами, функционирующими по другим схемам, с задействованием иных механизмов.

Вселение *G. fasciatus* в Ладожское озеро привело к увеличению продуктивности литоральных бентосных сообществ и более эффективной утилизации энергии, поступающей в литоральную зону. Изученные особенности питания *G. fasciatus* позволили прийти к заключению, что этот вид занял свободную экологическую нишу с использованием практически неиспользуемых ранее трофических ресурсов, в первую очередь различных макрофитов, широко распространенных в озере. Одним из последствий функционирования популяции этой амфиподы стал мелиоративный эффект, особенно выраженный в песчаных местообитаниях, во многих из которых до появления в озере *G. fasciatus* макробентос практически отсутствовал. Проявлением этого эффекта является и обнаруженное увеличение в 2 раза количественных показателей развития мейобентоса по сравнению с периодом конца 1980-х–начала 1990-х годов, когда *G. fasciatus* только осваивал литоральные биотопы [Литоральная зона Ладожского..., 2011].

Вселение *G. fasciatus* явилось важнейшим фактором изменения всей литоральной зоны Ладожского озера. Последующие инвазии *Pontogammarus robustoides* и *Chelicorophium curvispinum* в Волховскую губу озера также внесли существенный вклад в процесс новой трансформации, которая затронула литоральные биоценозы. При этом функционирование популяций инвазивных амфипод в Ладожском озере стало значительно влиять на перераспределение трансграничных потоков вещества и энергии между прибрежной береговой зоной, собственно литоралью и открытой зоной озера, делая более доступным недоиспользуемые ранее трофические ресурсы, в частности, для рыб. Таким образом, можно говорить об увеличении кормовой базы рыб и водоплавающих птиц.

В настоящее время наблюдается активное распространение *M. possolskii* в Ладожском озере. В 2014 г. этот вид был обнаружен в бухте Далёкая, а в 2017 г. – в районе мыса Осиновец и в центральной части бухты Петрокрепость [Kurashov, Trifonova, Barbashova, 2020; Barbashova, Trifonova, Kurashov, 2021]. В 2019 г. *M. possolskii* был зарегистрирован в районе пос. Назия [Современное состояние и проблемы..., 2021]. Исследования 2022 г. показали дальнейшее распространение *M. possolskii* как в южном, так и в северном направлении. С момента предыдущих исследований (в 2019 г.) вид колонизировал оставшуюся часть бухты Петрокрепость, где в августе 2022 г. достиг высоких количественных характеристик в районе д. Кобона (1420 экз./м², 4.82 г/м²), и распространился в Волховской губе. В литорали левее устья Волхова *M. possolskii* обитает совместно с *G. Fasciatus* и с *P. robustoides*. При этом типичный для данного местообитания *C. curvispinum* в 2022 г. обнаружен не был, а количественное развитие *P. robustoides* было невысоким (380 экз./м²). В районе пос. Заостровье в 2022 г. были обнаружены единичные экземпляры *M. possolskii*, что говорит о недавнем его проникновении в эту часть Волховской губы и о продолжающемся распространении вида в юго-западной части Ладожского озера. Подтверждено также расширение ареала *M. possolskii* к северу от Щучьего залива, где в бухте Терву его численность достигала 700 экз./м², а биомасса 2,15 г/м². В более северных исследованных биотопах вид обнаружен не был. Имеющиеся факты позволяют рассматривать вселение *G. fasciatus* и других амфипод в Ладожское озеро как положительное явление, подобно вселению *Nereis diversicolor* O. F. Müller в Каспийское море, где этот вид стал важнейшим трофическим ресурсом для ценных пород рыб, в частности, для осетровых.

В мае 2019 г. в Волховской губе Ладожского озера было сделано поистине уникальное открытие, которое может знаменовать собой новый этап в перестройке экосистемы озера, а именно, при помощи необитаемого подводного аппарата была выявлена инвазия чужеродного для озера моллюска дрейссены полиморфной *Dreissena polymorpha* (Pallas) [Dudakova, Dudakov, Kurashov, Anokhin, 2021]. Возраст некоторых найденных моллюсков достигал 5 лет, что говорит об успешном вселении дрейссены в Ладожское озеро и её натурализации. Анализ видеоматериалов, полученных при подводной видеосъемке с необитаемого подводного аппарата, позволил выявить особенности рас-

предела моллюска в исследованной части акватории. Обнаружено, что моллюски располагаются единично и чаще на боковой поверхности крупных валунов; на гальке и мягком грунте они присутствуют гораздо реже. Таким образом, чередование полос крупнообломочного материала и песка, характерное для литорали Волховской губы, определяет гетерогенность распределения вселенца. Отмечена также общая тенденция увеличения его численности с глубиной: наибольшая плотность поселения дрейссены наблюдалась на глубинах более 4,5 м. Пока популяция дрейссены в Ладоге развита слабо и, по-видимому, не составляет значимой конкуренции аборигенным видам моллюсков и не оказывает существенного влияния на структуру и функционирование бентоса в целом. В то же время, обнаруженная способность адаптации дрейссены к низкоминерализованной воде Ладожского озера в условиях изменяющегося климата не исключает дальнейшего распространения вида в этом водоеме и значительной трансформации бентосных биоценозов подобно тому, как это произошло в близких по генезису к Ладожскому озеру Великих американских озерах, где вселение дрейссены привело к вытеснению многих аборигенных видов моллюсков и значительным структурным перестройкам их экосистем.

Обстоятельство обнаружения в Ладожском озере новых чужеродных видов-вселенцев из числа наиболее агрессивных инвазивных видов амфипод, а также дрейссены полиморфной делает крайне необходимым дальнейшие подробные исследования по распространению этих видов в Ладожском озере и контролю возможных вселений чужеродных организмов, поскольку, в связи с этими инвазиями, реализуется угроза серьезных экосистемных трансформаций в литоральной зоне крупнейшего европейского озера.

На современном этапе проведения научных работ должны быть реализованы два генеральных направления исследования литоральной зоны:

1) Исследовательское направление, включающее:

- изучение биоразнообразия литоральной зоны;
- исследование биотических взаимодействий между отдельными сообществами и видами (включая чужеродные);
- исследование факторов, влияющих на развитие литоральных биоценозов;
- классификацию экотон по преобладающему субстрату, типам растительных ассоциаций и динамике вод;
- всестороннее изучение биоценозов и процессов в выделенных экотонах;
- дистанционное (спутниковое зондирование, беспилотные летательные аппараты) картирование литоральной зоны и одновременное наземное изучение характеристик экотон. Создание на этой основе ГИС и получение полного представления о биологических и экологических ресурсах литоральной зоны.

2) Мониторинговое направление, включающее:

- мониторинг экологического состояния в зонах экологического риска с преимущественным использованием сообществ модельной ассоциации тростника южного *Phragmites australis*;
- мониторинг стабильности литоральных биоценозов на основе анализа низкомолекулярного метаболома водных макрофитов, прежде всего *Potamogeton perfoliatus*;
- мониторинг биоинвазий;
- эколого-токсикологический мониторинг.

Дальнейшие исследования литоральной зоны позволят получить детальные сведения о биологическом разнообразии Ладожского озера и проводить его контроль, в том числе биологические инвазии; оценить экологическое состояние прибрежной зоны озера, прежде всего, в зонах экологического риска; оценить биологические и экологические ресурсы литоральной зоны; способствовать выработке планов рационального использования и социально-экономического развития прибрежной зоны Ладожского озера и прилегающих территорий.

Таким образом, проведенные в последние годы комплексные исследования экосистемы Ладожского озера и его притоков в условиях воздействия природных и антропогенных факторов, в целом, подтверждают факт достаточно благополучного и стабильного состояния озера. Определяющее воздействие оказывают именно естественные факторы природной среды. В то же время, на локальных участках прослеживается, иногда заметное, влияние антропогенных факторов, которые приводят к нарушениям в протекании озерных гидрохимических и гидробиологических процессов,

что отражается в фиксируемых соответствующих изменениях гидрохимических и гидробиологических характеристик. Кроме того, целый ряд характеристик косвенно указывает на рост первичной продуктивности водоёма, что вызывает определенные опасения из-за возможного нового этапа эвтрофирования водоёма.

В прибрежной зоне одним из важнейших факторов являются виды-вселенцы, продолжается распространение некоторых из них по акватории озера, что неизбежно приводит к новым трансформациям его экосистемы. Следует учитывать двойственный характер инвазионного процесса, естественный и антропогенный, что в совокупности стало причиной значительных изменений в литоральной и прибрежной зонах озера.

Особо следует подчеркнуть, что ни в коем случае нельзя допускать увеличения антропогенной нагрузки на озеро, его загрязнения, поскольку этот огромный водоем имеет большую инерционность и, если произойдет сдвиг в его экологическом состоянии в худшую сторону, то возврат озера в благоприятное состояние при принятии даже всех необходимых мер займет не менее 2–3 десятилетий.

Работы по исследованию экосистемы Ладожского озера и его притоков во всей полноте обозначенных выше проблем и задач требуют усилий коллектива высококвалифицированных лимнологов (гидробиологов, гидрохимиков, гидрологов и др.). К сожалению, приходится констатировать, что в настоящее время эти исследования не могут проводиться так, как были бы должны. После включения Института озероведения в «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН) в 2020 г. лимнологические исследования экосистемы Ладоги не только не прогрессировали, но постепенно сокращались. Например, в 2020 г. Лаборатория гидробиологии ИНОЗ РАН перед объединением в СПб ФИЦ РАН состояла из 16 человек (из них 2 доктора наук и 7 кандидатов наук), а в начале 2022 г. только из 10 (из них 2 доктора наук и 6 кандидатов наук). Причем, Лабораторию покинули как опытные, так и молодые сотрудники. В итоге оказалась утрачена возможность исследовать такие важнейшие сообщества гидробионтов в Ладоге, как фито- и зоопланктон. Следует также учесть, что сотрудники лаборатории в настоящее время работают на 0,25–0,5 занимаемых ставок. Для сравнения: в 2006 г. в состав лаборатории гидробиологии входили 20 человек (из них 5 докторов наук, 11 кандидатов наук), работавших на полную ставку. Остается только надеяться, что в будущем ИНОЗ РАН сможет вернуться к нормальному функционированию, а необходимые для науки, народного хозяйства и водной экологической безопасности Северо-Запада РФ исследования Ладожского озера и его притоков будут продолжены в полном объеме.

Глава 5

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ЛАНДШАФТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Институт озераедения РАН длительное время проводит геолого-геоморфологические и ландшафтные исследования дна и берегов Ладожского озера. За долгий период исследований был накоплен значительный объем знаний, в получении которых участвовали также и многие другие организации, в числе которых можно упомянуть Всероссийский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Арктический и Антарктический институт (АНИИ), НПО «Севзапгеология», ВНИИОкеангеология, Институт водных проблем севера РАН, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Институт геологии Карельского научного центра РАН, и многие другие.

Результаты исследований были опубликованы в многочисленных статьях и монографиях, в частности, таких известных ученых, как: академик АН СССР, д.г.н. Станислава Викентьевича Калесника [Калесник, 1968], первого директора Института озераедения; к.г.н. Николая Ивановича Семеновича [Семенович, 1966], первого Ученого секретаря ИНОЗ РАН; д.г.н. Галины Сергеевны Бискэ [Ладожское озеро: Развитие..., 1978]; к.г.н. Бориса Ивановича Кошечкина [Кошечкин, 1979]; к.г.-м.н. Алексея Владиславовича Амантова [Амантов, 1993; Амантов, 2014; Амантов, Амантова, 2014] и многих других. Также результаты геолого-геоморфологических и ландшафтных исследований были опубликованы в фундаментальных сборниках: один из томов многотомника «Истории озер СССР», посвященный Ладожскому озеру [История Ладожского..., 1980] и ряде монографий и атласов, созданных ИНОЗ РАН, в т.ч. [Ладога, 2013; Ладожское озеро и достопримечательности..., 2015, Современное состояние и проблемы..., 2021], геоморфологическая и тектоническая схемы из комплекта Государственной геологической карты (ГГК-1000) [Государственная геологическая карта..., 2016]. Сотрудники Института озераедения ведут исследования, относящиеся к данной тематике [Анохин, Науменко, Нестеров, 2016; Особенности геоморфологического строения..., 2018; Анохин, Дудакова, 2019, Анохин, Дудакова, Дудаков, 2019, Дудакова, Анохин, Дудаков, 2021; Дудакова, Юдин, 2022]. Эти работы дают необходимый фундамент знаний для дальнейшего геолого-геоморфологического и ландшафтного изучения дна и берегов Ладожского озера. Сейчас в Институте озераедения данное научное направление развивают д.г.н. Владимир Михайлович Анохин и к.б.н. Дина Сергеевна Дудакова [Анохин, Дудакова, 2019, Анохин, Дудакова, Дудаков, 2019].

Используемые в настоящее время карты и схемы донных осадков Ладожского озера в существенной степени устарели. В частности, построения Н.И. Семеновича [Семенович, 1966], основанные в существенной части на визуальных определениях типов осадков, будучи достаточно полными для своего времени, по прошествии почти 60-ти лет нуждались в пересмотре хотя бы по причине появления спутниковой навигации, дающей более точную привязку станций пробоотбора. Наиболее новой на настоящий момент является Литологическая карта поверхности дна акваторий из комплекта Государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000, листы Р-35, 36 2015 г. [Государственная геологическая карта..., 2016]. Но масштаб этой карты позволяет видеть лишь общую картину распространения осадков на дне Ладожского озера, не позволяя фиксировать детали. Явно назрела потребность создания более современной карты распространения донных отложений Ладожского озера. С течением времени совершенствуются методики изучения донных осадков, появляются новые инструменты исследования, такие, как подводная фотовидеосъемка, спутниковая привязка, дисперсионная лазерная гранулометрия и другие, позволяющие в значительной степени актуализировать существующие литологические построения.

Донные ландшафты Ладожского озера исследованы в гораздо меньшей степени по сравнению с литологией дна. Ранее зональное районирование донных ландшафтов проводилось в 1990-х гг. по результатам работ ВНИИОкеангеология на акватории озера [Геоэкология Ладожского озера, 1995]. Детальные топологические исследования ландшафтов на Ладожском озере, охватывающие всю акваторию, не осуществлялись. С 2013 г. в рамках темы Госзадания ИНОЗ РАН начали осуществляться планомерные исследования топологической структуры ландшафтов разных зон, а также накапливаться и обобщаться данные по ландшафтам разных частей акватории Ладожско-

го озера и оцифровываться имеющиеся картографические материалы, в дальнейшем вошедшие в качестве слоев в цифровую ландшафтную модель [Дудакова, Анохин, Дудаков, 2021; Подводные ландшафты островов, 2021; Дудакова, Юдин, 2022].

Для целей исследования характера поверхности дна и непосредственного визуального наблюдения за биотой, являющихся важными элементами при характеристике ландшафтов, в ИНОЗ РАН был создан подводный телеуправляемый необитаемый аппарат (ТНПА) Limnoscout, (рис. 5.1) в дальнейшем трансформировавшийся в несколько модификаций (Limnoscout-230, Limnoscout-50, Limnoscout-N, Limnoscout-50+) [Дудакова, Дудаков, Анохин, 2018; Дудакова, Анохин, Дудаков, 2020].



Рис. 5.1. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат Limnoscout-230 в различных модификациях 2018–2020 гг.

Использование фотовидеосъемки является неотъемлемой частью исследований подводных ландшафтов. С помощью созданного ТНПА опыт и методики морских исследований были успешно применены в работах на Ладожском озере, несмотря на более сложные условия проведения видеосъемки по сравнению с более прозрачными морскими водами. Методики, трансформированные под условия водоема, были успешно применены на всей акватории озера. Исследования мелководья также сопровождались аэрофотосъемкой с беспилотного летающего аппарата (БПЛА), что позволяло идентифицировать мезомасштабные элементы дна, неразличимые в масштабах подводной видеосъемки [Дудакова, Анохин, Дудаков, 2021]. Видеосъемкой были охвачены все зоны Ладожского озера. В 2021 г. было проведено первое погружение ТНПА Limnoscout на максимальную для водоема глубину – 230 м. Цифровая информация о глубинах, позволяющая характеризовать морфологию дна и служащая для построения цифровых моделей рельефа, снималась с эхолотакартплоттера Garmin-585, работающего в стандартном режиме промера глубин. В 2022 г. для целей крупномасштабного картирования стал применяться эхолот с функцией бокового обзора Hummingbird SOLIX10 SI+, позволивший получать более информативно насыщенные данные о рельефе дна, объектах на нем и их пространственном распределении. Локатор бокового обзора в связке с подводным видеонаблюдением позволил выявить новые сведения о ладожских донных ландшафтах. Обработка получаемых цифровых материалов с использованием геоинформационных систем (ГИС) позволяет создавать качественные картографические продукты.

Результаты изучения поверхностных донных отложений в северной части Ладожского озера. Сотрудники ИНОЗ РАН продолжают изучение донных отложений Ладожского озера. В 2019 г. сотрудниками Института был осуществлен донный пробоотбор в северной части озера с борта научно-исследовательского судна «Посейдон» по 84 станциям пробоотбора в северной части Ладоги.

Результаты изучения донных осадков сведены в схему распределения донных отложений по точкам пробоотбора в северной части Ладожского озера (рис. 5.2). Эта схема строилась на основе данных собственного донного пробоотбора с учетом предшествующих построений [Семенович, 1966; Государственная геологическая карта..., 2016]. Стоит отметить, что построения проводились на высокоточной батиметрической основе, которая составлена на базе наиболее полной цифровой модели рельефа, находящейся в распоряжении ИНОЗ РАН [Науменко, 2013; Науменко, Гузиватый, Нестеров Субетто, 2019]. При создании карты также учтена информация подводных фотовидеосъемок, большей частью в береговой зоне.

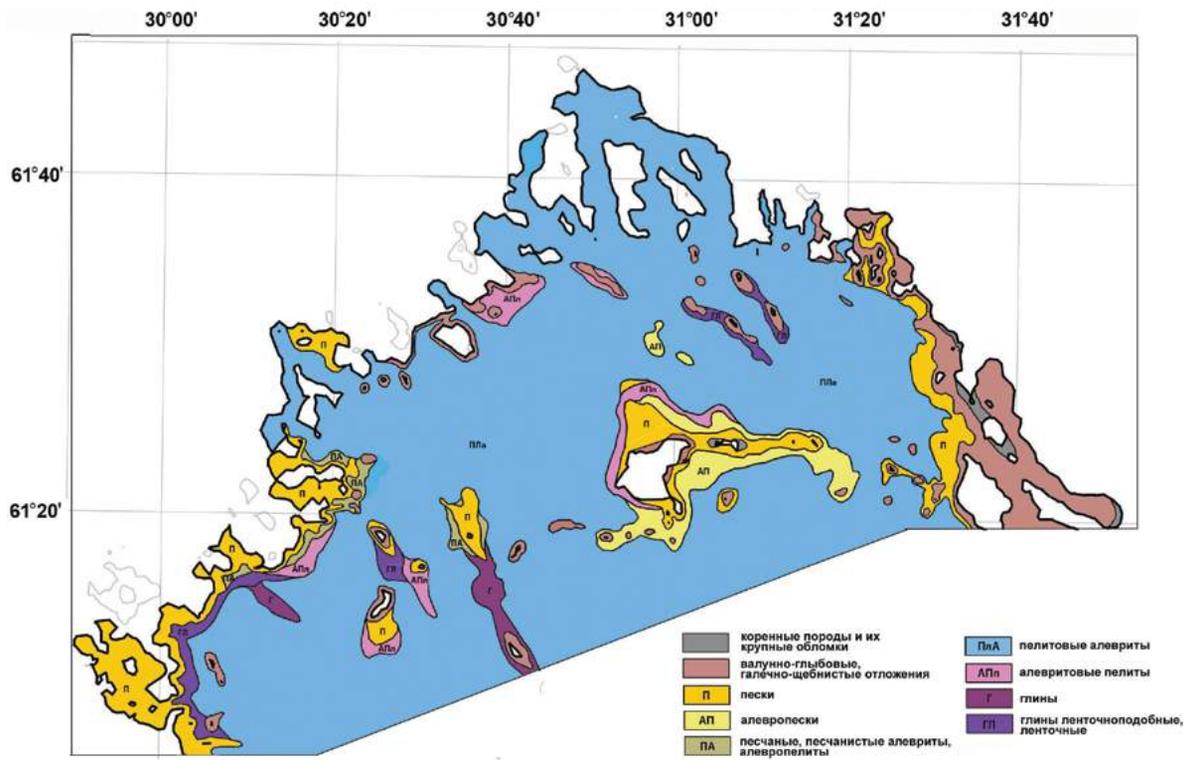


Рис. 5.2. Схема распространения типов донных отложений в северной части Ладожского озера

На схеме отчетливо видно, что при общем сохранении обычной зональности распространения разнотипных донных отложений в крупных водоемах с коренными берегами с увеличением глубины имеется и ряд особенностей. В частности, заметно заполнение алевропелитовыми отложениями мелководных зон во фиардах северного побережья озера, где эти осадки подходят практически к самому берегу до глубин нескольких метров. Пелитовые осадки, напротив, часто занимают более высокую позицию на бортах глубоководных котловин, чем алевропелиты. Это может говорить об особенностях более глубинного строения осадочного чехла, при котором глубокие котловины заполнены современными алевропелитами, а борта этих котловин могут быть сложены более древними осадками (возможно, верхней частью отложений Балтийского ледникового озера).

При продолжении донного пробоотбора до покрытия всей акватории Ладожского озера в ближайшие годы в рамках темы Государственного задания ИНОЗ РАН планируется создание общей карты донных осадков Ладожского озера.

Особенности распространения песков тяжелой фракции в прибрежных отложениях Ладожского озера. Исследования гидродинамических процессов и тесно связанных с ними литологических характеристик и процессов береговой зоны исключительно важны для оценки и мониторинга состояния, в частности, прибрежных экосистем. Литология береговых отложений Ладожского озера изучалась длительное время [Амантов, Амантова, 2014; Геоэкология Ладожского озера, 1995; Ладога, 2013; Ладожское озеро и достопримечательности..., 2015]. Однако состав и свойства песчаных частиц тяжелой фракции в этих отложениях изучались отрывочно и не охватывали всего периметра береговой области. Сотрудники ИНОЗ РАН под руководством д.г.н. В.М. Анохина впервые целенаправленно с 2015 г. по настоящее время проводят отбор проб тяжелой фракции для изучения распространения разных типов шлиховых минералов по всему побережью Ладоги.

Береговая зона Ладожского озера имеет ряд характерных особенностей, среди которых следует отметить следующие. На северном побережье, сложенном коренными породами, преобладают берега фиардово-шхерного типа. Западное побережье, сложенное в основном псефитовыми отложениями, характеризуется господством абразионно-аккумулятивного типа берегов. Южный берег озера в значительной степени является пляжем, весьма существенно заросшим крупными расте-

ниями – макрофитами, заросли которых в основном и определяют его облик, что подтверждается спутниковыми снимками и данными воздушной съемки с БПЛА [Анохин, Дудакова, Дудаков, 2019; Современное состояние и проблемы..., 2021]. На восточном берегу при движении с юго-востока на северо-запад прослеживается последовательная смена типов берегов: песчаные пляжи сменяются валунными абразионно-аккумулятивными и далее фиардово-шхерными берегами [Анохин, Дудакова, Дудаков, 2019; Современное состояние и проблемы... 2021]. Исследовались рыхлые отложения на всех этих типах берегов. Методика отбора шлиховых проб соответствовала традиционным методам [Бакулина, 2014] и сводилась к промывке рыхлых отложений промывочным лотком с выделением тяжелой песчаной фракции (шлиха). Проба начальным весом около 20 кг отбиралась из прибрежных песков до 1 м от уреза воды. Шлих сознательно не домывался для снижения потерь частиц, способных дать информацию (что привело к значительному содержанию кварца в шлихе). Минеральный состав, крупность, окатанность частиц шлихов изучались под микроскопом при 80–100 кратном увеличении. Были составлены диаграммы с информацией о составе, крупности и окатанности частиц тяжелой фракции. Эти диаграммы были вынесены на схему Ладожского озера с привязкой каждой диаграммы к точке отбора соответствующей пробы (рис. 5.3).

По результатам минералогического анализа состав шлиховых проб береговой зоны Ладожского озера представлен следующими минералами: кварц, магнетит, гранат, реже – полевой шпат, слюда, сульфиды (пирит и халькопирит) и частицами пород: обломки гранитоидов и частицы глин в разных комбинациях и пропорциях [Особенности распространения тяжелой..., 2018].

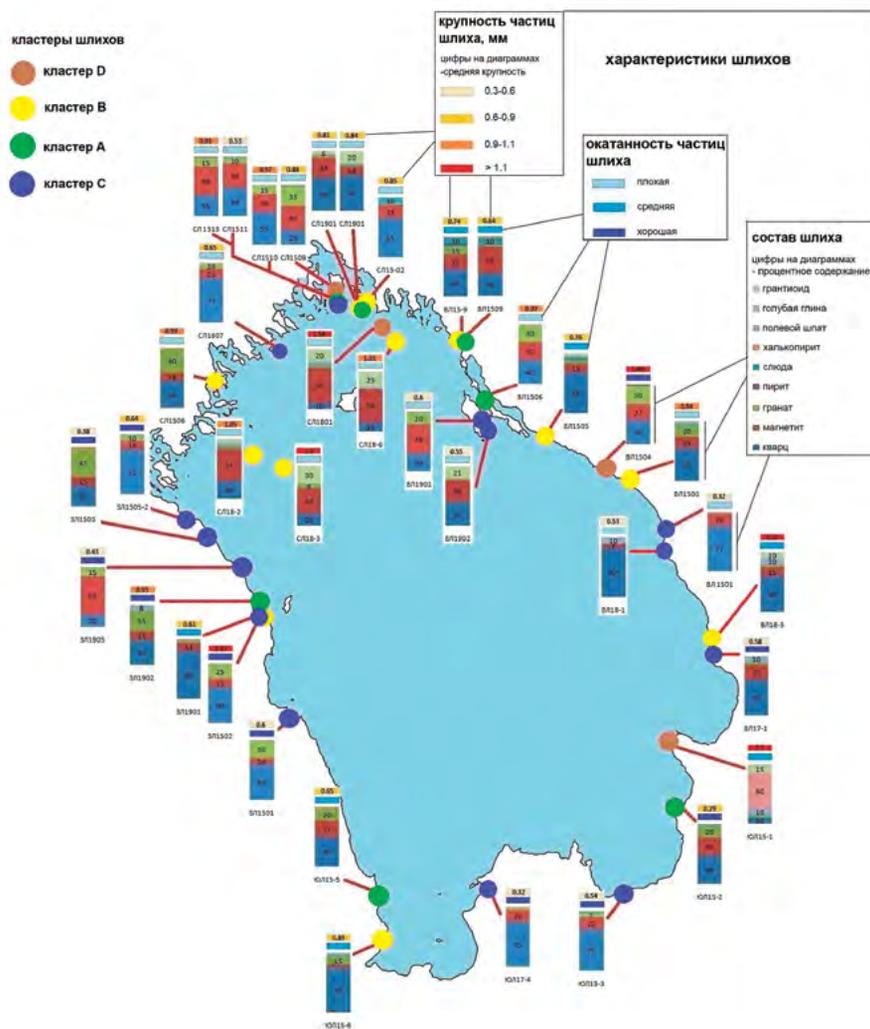


Рис. 5.3. Характеристики тяжелой фракции рыхлых отложений берегов Ладожского озера. В каждой колонке: верхний прямоугольник – крупность частиц шлиха, мм; ниже – окатанность; ниже – состав шлиха; ниже – номер станции. Процентное содержание указано для компонентов шлиха, значение которых более 5 %

Исключительные размеры Ладожского озера обуславливают большое разнообразие типов строения берегов, которые объединяются в районы по типологическому сходству. В водоеме выделяют северную, восточную, западную и южную береговые зоны. В табл. 5.1 представлены средние характеристики шлиховых проб по четырем структурно-геоморфологическим районам береговой зоны Ладожского озера.

Табл. 5.1. Средние характеристики шлиховых проб по районам береговой зоны Ладожского озера

Содержания, %	Район береговой зоны			
	Северный	Восточный	Южный	Западный
кварц	43	62	64	55
магнетит	33	19	23	22
гранат	14	11	11	21
пирит	0	1	0	0
слюда	2	0	1	0
халькопирит	0	0	0	0
полевого шпат	1	6	0	2
голубая глина	0	0	1	0
гранитоид	6	2	0	0
средняя крупность	0,84	0,9	0,94	0,76
средняя окатанность	2,17	2,24	2,56	2,58

Южный и восточный районы имеют схожие характеристики содержания основных компонентов шлихов (кварц, магнетит, гранат), но для восточного района характерно также присутствие в пробах полевого шпата. Северное побережье имеет самый большой диапазон изменчивости минералогического состава шлихов от станции к станции. В шлихах данного района содержание кварца снижено по сравнению с остальными районами, но отмечается высокое содержание магнетита и присутствие значительного количества частиц гранитоида в шлихах. Шлихи западного побережья практически полностью состоят из зерен кварца, магнетита и граната. Количество кварца в пробах чуть больше половины, а содержание граната и магнетита практически одинаково. В шлихах присутствует полевой шпат в малом количестве.

Данные анализа дают основания предполагать наличие устойчивого переноса обломочного материала вдоль всего северного побережья на восток и на запад [Пятов, Анохин, 2021].

На всех 4-х участках побережья Ладожского озера обнаружены вероятные тенденции к устойчивому переносу тяжелой фракции донных отложений в определенном направлении: на южном берегу – на запад, на западном – на север, на северном – на восток и на восточном – на юго-восток. Вместе расположение этих цепочек показывает общую тенденцию к вдольбереговому устойчивому переносу донных отложений по часовой стрелке.

При интерпретации результатов анализа распространения тяжелой фракции необходимо помнить, что условия отбора шлиховых проб отличаются друг от друга по геоморфологическим, лито- и гидродинамическим характеристикам. Это вносит некоторый элемент неопределенности во все сделанные выводы. Эту неопределенность можно существенно снизить в дальнейшем увеличением количества проб, отбираемых как можно более равномерно по всем берегам озера.

Тектонические уступы на дне Ладожского озера. Дно Ладожского озера имеет довольно сложный рельеф, особенно в своей северной части, расположенной в пределах Балтийского кристаллического щита. Рельеф дна здесь имеет высокую степень расчлененности (перепады глубин 100–200 м) и характеризуется преобладанием линейно вытянутых форм рельефа в основном северо-западного

простираются. Все найденные субвертикальные уступы расположены в северной части озера, с высокой расчлененностью рельефа дна. Южнее склоны Балтийского щита полого погружаются под осадочный чехол Русской платформы, кристаллические породы перекрываются все более мощной толщей осадочных рифейских, вендских и фанерозойских отложений. Рельеф становится менее расчлененным (перепады глубин 1–10 м). Формы теряют четкую направленность и линейность. Описываемые уступы были обнаружены в процессе ландшафтных донных исследований при подводной фотовидеосъемке дна с помощью подводного аппарата Limnoscout-230, сконструированного в ИНОЗ РАН специально для применения в Ладожском озере (рис. 5.1). Этот аппарат имеет ряд конструктивных особенностей, которые позволяют ему успешно (впервые в истории) осуществлять фотовидеосъемку дна Ладоги [Дудакова, Анохин, Дудаков, 2020].

Аппарат буксировался на высоте около 0.5 м над дном на глубинах 80–120 м вкостр простирания структур рельефа. При столкновении с уступом в нижней его части аппарат начинал подъем с одновременной фотовидеосъемкой уступа. Во время подъема камера фиксировала вертикальную стенку, сложенную коренными породами, иногда с отрицательными углами. При этом лодка, с которой работал аппарат, при столкновении аппарата с уступом становилась на якорь над бровкой уступа, обычно на глубинах до 20–30 м. То есть перепад глубин составлял до 100 м. Все обнаруженные уступы расположены в северной части озера, в 3-х районах: на борту впадины вблизи г. Питкяранта, на склоне островной гряды Мустаасаари и на западном подводном склоне острова Валаам (рис. 5.4).

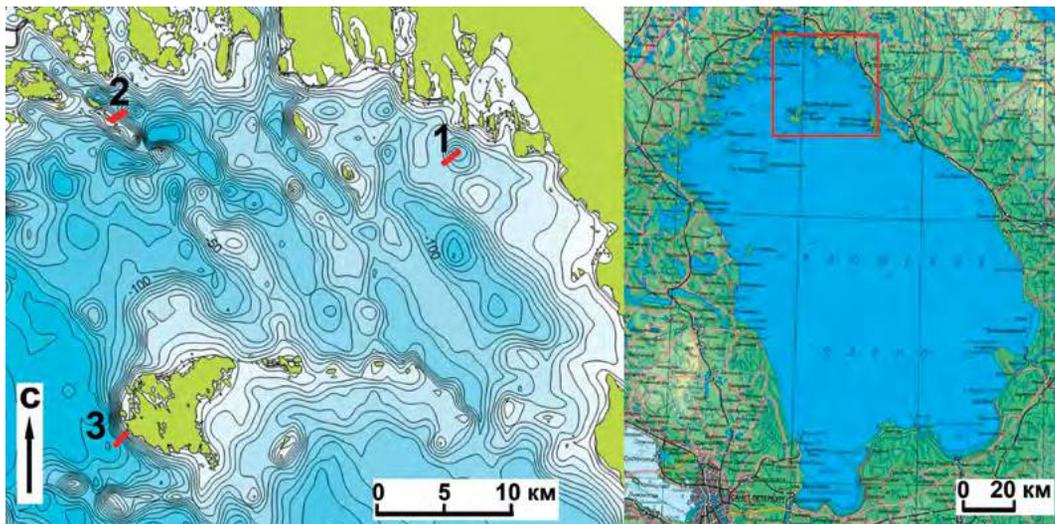


Рис. 5.4. Положение профилей донной фотовидеосъемки, обнаруживших субвертикальные уступы, на батиметрической схеме северной части Ладожского озера (батиметрия построена на основе цифровой модели рельефа С.Н. Юдина и Д.С. Дудаковой [Дудакова, Юдин, 2022], изобаты через 10 м). 1 – профиль в районе Питкяранта, 2 – профиль в районе Мустаасаари, 3 – профиль в районе Валаам. Слева – положение района работ на акватории Ладожского озера

Геологическая ситуация в районе описываемых профилей различается [Государственная геологическая карта..., 2016]. Профиль в районе Питкяранта располагается на границе сортавальской серии людиковия (сланцы базальты и их туфы, доломиты) с песчаниками рифея. В районе профиля Мустаасаари контактируют гнейсы лахденпохского метаморфического комплекса и туфопесчаник-конгломерат-алевролитовые флишеидные образования ладожской серии калевия. Породы людиковия и калевия прорываются телами гранитов. В районе о. Валаам геологический разрез складывается рифейскими песчаниками, гравелитами, алевролитами салминской свиты и габбро-долеритами пластовой Валаамской интрузии.

На рис. 5.5 представлены фотографии обнаруженных уступов в границах площади захвата фотокамеры (порядка 1–2 м в высоту). Схожие картины наблюдались и фиксировались на протяжении всего подъема камеры с глубин, превышающих 100 м до 20–30 м. На фотографиях можно видеть обнажающиеся в субвертикальном уступе коренные породы, разбитые на блоки системами трещин. Блоки имеют острые края без следов обработки волновыми процессами. Следов ледниковой обработки также не обнаружено.

На рис. 5.6 изображены профили, построенные поперек всех трех уступов на основании комбинированных данных эхолота и спутникового позиционирования контактов аппарата со стенкой.

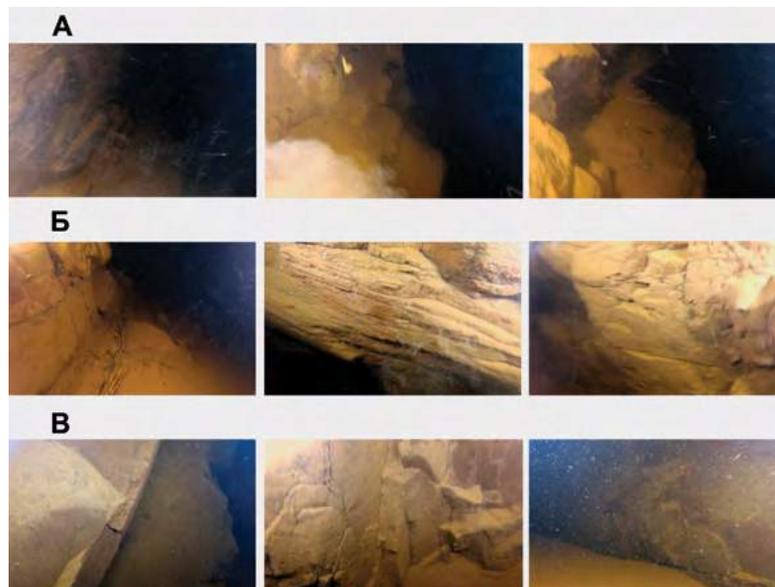


Рис. 5.5. Фотографии фрагментов субвертикальных уступов. А – в районе Мустасаари (глубины на снимках (слева направо): 80, 90 и 100 м); Б – в районе Валаам (65, 90 и 100 м); В – в районе Питкяранта (70, 95 и 100 м)

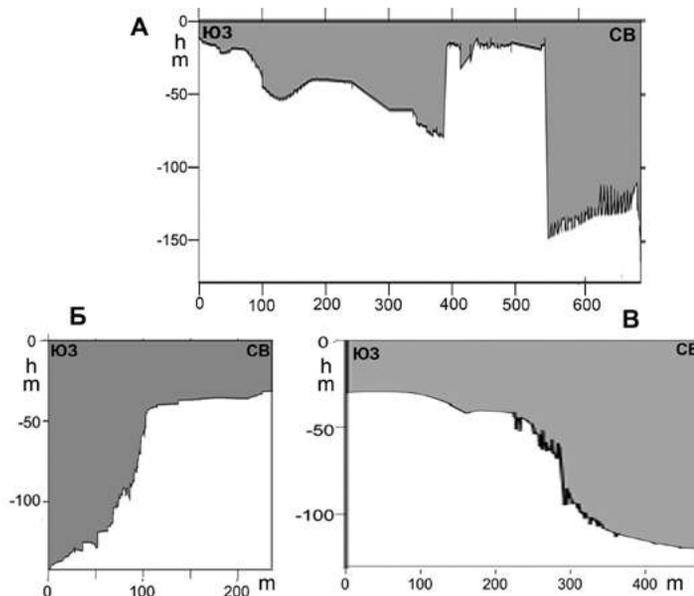


Рис. 5.6. Поперечные профили дна в районах субвертикальных уступов. А – Мустасаари, Б – Валаам, В – Питкяранта

Размеры и форма всех трех уступов свидетельствуют об их тектоническом происхождении. При сопоставлении пространственного положения найденных уступов с существующими тектоническими схемами обнаруживается их хорошее совпадение по позиции и простираию с известными зонами разломов (рис. 5.7).

При сопоставлении пространственного положения обнаруженных уступов с существующими батиметрическими картами обнаружено их совпадение с линейно-вытянутыми склонами северо-западного простираия на бортах впадин, которые, считаясь крутыми, не превышают по уклону 40–50°. По всей вероятности, обнаруженные уступы соответствуют по простираию этим склонам и могут быть трассированы вдоль них.

Сведения о тектоническом строении шхерного района Северного Приладожья и, в частности, о признаках неотектонических движений на участках вблизи описываемых профилей приведены в публикациях Л.П. Свириденко, А.П. Светова [2008]. При детальном исследовании, выполненном указанными авторами, на береговых уступах о. Валаам выявлены многочисленные признаки разломообразования: зоны милонитизации, катаклаза, зеркала скольжения. Здесь также зафиксированы зияющие трещины с расхождением стенок на 0,5–1,5 м, вертикальные блоковые перемещения, сопровождаемые малоамплитудными сдвиговыми дислокациями, на других островах Валаамского архипелага установлена амплитуда вертикального перемещения блоков в первые десятки метров. В работе приводятся данные по сейсмодислокациям, отмечены эпицентры землетрясений на о. Валаам, а также на островах гряды Маркатсимансаари-Мустасаари.

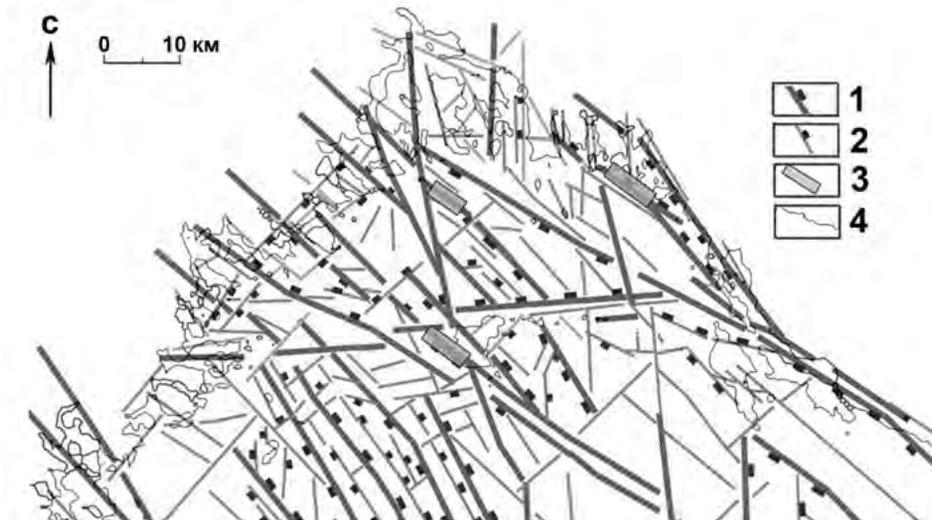


Рис. 5.7. Положение изучаемых субвертикальных уступов в сети разломов северной части Ладожского озера (рисовка сети разломов – В.М. Анохин, С.И. Петухов, М.А. Науменко [2021], с использованием [Амантов, 2014; Петухов, Анохин, Науменко, 2020]: 1 – разломы 1-го порядка с указанием направления сброса, 2 – разломы 2-го порядка с указанием направления сброса, 3 – положение изучаемых уступов, 4 – береговая линия

На тектонической схеме из комплекта Государственной геологической карты 1:1 000 000 [Государственная геологическая карта..., 2016] в районе обнаруженного уступа у г. Питкяранта отмечаются мощные зоны катаклаза, что также является признаком разломообразования. Результаты сейсмологических и палеосейсмологических исследований говорят о существенной сейсмической активности в районе Ладожского озера в голоценовое время, включая исторический период [Ассиновская, 2005; Ассиновская, Карпинский, 2020; Бискэ, Сумарева, Шитов, 2009; Никонов, 2005; Шитов, Бискэ, Сумарева, 2010].

Обобщая вышеизложенное, можно сказать следующее. По составу (коренные породы), морфологии (высокие субвертикальные линейно-вытянутые уступы) и пространственному соответствию известным зонам разломов и явлениям, связанным с разломообразованием, данные уступы могут быть предположительно признаны морфологическими выражениями тектонических объектов – разломов существенно сбросового типа. Отсутствие на блоках коренных пород видимых следов гляциальной обработки по мнению авторов свидетельствует о послеледниковом возрасте образования этих уступов и, соответственно, о довольно мощных голоценовых тектонических движениях в районе Ладожского озера.

О возможности существования подобных уступов на дне северной части Ладожского озера сообщали несколько авторов [Амантов, 2014; Науменко, Гузиватый, Нестеров, Субетто, 2019]. В публикации [Науменко, Гузиватый, Нестеров, Субетто, 2019] речь шла об уступах о. Валаам высотой до нескольких десятков метров от дна и с максимальными уклонами склонов до 60°. То есть, в данном исследовании не было обнаружено вертикальных стен с уклонами склонов больше 60°. В исследовании [Амантов, 2014] были отмечены отдельные малоамплитудные разломы, пликативные дис-

локации и локальные структуры, часто наследующие элементы наиболее выраженных рифейских структурных элементов Вуоксинской рубцовой синклинали и Пашского грабена.

Авторским коллективом под руководством В.М. Анохина было проведено эхолотное профилирование дна, многократно проведенное авторами поперек обнаруженных уступов, также не дало значимых результатов – над вертикальной стенкой эхолоты 2-х разных типов показали лишь зоны потери корреляции. Таким образом, лишь визуальное изучение дна с помощью подводного аппарата позволило увидеть реальную картину наличия на дне Ладожского озера ряда крупных, вероятно молодых, тектонических уступов. В дальнейшем это изучение будет продолжено, в том числе в районах, где возможно обнаружение новых уступов, или иных геоморфологических объектов.

На основании результатов проведенных исследований дна Ладожского озера сделаны следующие выводы:

- на дне северной части Ладожского озера с помощью подводной фотовидеосъемки обнаружены три субвертикальных уступа, сложенных коренными породами, высотой до 70–100 м;
- по составу (коренные породы), морфологии (высокие субвертикальные линейно-вытянутые уступы) и пространственному соответствию известным зонам разломов, данные уступы предположительно могут быть признаны морфологическими выражениями тектонических объектов – разломов предположительно сбросового типа;
- по отсутствию на блоках коренных пород видимых следов гляциальной обработки можно предположить голоценовый возраст образования этих уступов и, соответственно, существование современных активных тектонических движений в районе Ладожского озера.

Донные ландшафты Ладожского озера. Важнейшим достижением исследований явилось создание цифровой модели ландшафтов Ладожского озера [Дудакова, Юдин, 2022].

На основе собственных наблюдений, литературных и фондовых источников к.б.н. Диной Сергеевны Дудаковой и Сергеем Николаевичем Юдиным в 2018 году создана первая версия базы данных (БД), обобщающая доступные лимнологические, геофизические, геологические, аналитические и биологические данные по акватории Ладожского озера. В последующие годы база уточнялась и пополнялась, преимущественно за счет собственных данных, полученных при полевых работах Института озераедения. Необходимая ретроспективная информация по конкретным признакам (слоям базы) снималась с растровых изображений карт и с таблиц в текстовых приложениях к опубликованным отчетам, также использовались собственные данные. Итоговая ландшафтная модель, построенная на основе БД, представляет собой набор цифровых слоев в ГИС программах и атрибутивных таблиц с координатной привязкой точек, что позволяет делать необходимые выборки и строить наборы карт по любому включенному в модель параметру. По материалам БД составлен авторский вариант цифровой батиметрической модели Ладожского озера. При разработке данной цифровой модели рельефа (ЦМР) и цифровой модели ландшафтов использовались современные возможности геоинформационных технологий. Последнее дает широкие возможности для ее дальнейшего развития и совершенствования при получении новых данных. Модель пригодна как для регионального районирования, так и выделения крупномасштабных (топологических) элементов ландшафтов, спускаясь до отдельных фаций в локальном районе.

Составленная с использованием ландшафтной модели схема ландшафтных районов (рис. 5.8) [Дудакова, Юдин, 2022], в целом, повторяет основные компоненты регионального ландшафтного деления, проведенного с помощью кластерного анализа, которое выполнено В.И. Гуревичем в составе коллектива ВНИИОкеангеология по результатам работ 1989–1992 гг. [Геоэкология Ладожского озера, 1995]. Следует отметить, что в новой схеме увеличено количество районов в северной шхерной части и учтен тектонический фактор, в том числе наличие кольцевых структур, выделенных сотрудником Института геологии Карельского научного центра РАН А.П. Световым [Свириденко, Светов, 2008], которые оказали влияние на формирование донных ландшафтов, особенно в северной и центральной частях озера.

Применение топологического подхода для выявления структуры и состава отдельных типов ландшафтов, особенно сложно устроенных прибрежных участков акватории, привело к созданию серии крупномасштабных карт разных районов Ладожского озера [Дудакова, Анохин, Дудаков, 2021; Подводные ландшафты островов..., 2021].

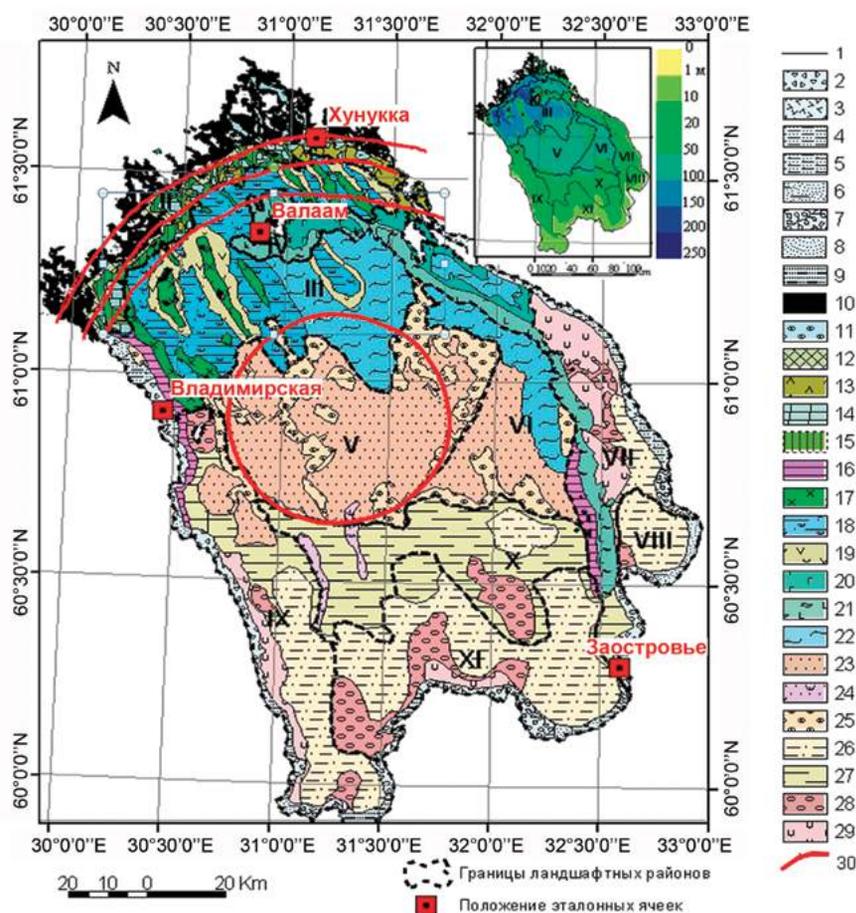


Рис. 5.8. Динамическая картосхема подводных ландшафтов Ладожского озера, полученная на основании ландшафтной модели

Ландшафты прибрежные и мелководных террас: 1 – абразионные террасы склона северного шхерного района, врезаемые в кристаллические породы архейского и протерозойского комплекса (внемасштабные); 2 – абразионно-аккумулятивные террасы западного склона, сложенные существенно валунно-глыбовыми отложениями; 3 – абразионно-аккумулятивные террасы восточного склона, сложенные существенно валунно-глыбовыми отложениями; 4 – аккумулятивные террасы западного склона, созданные волновыми процессами, пляжевые; 5 – аккумулятивные террасы восточного склона, созданные волновыми и озовыми процессами, пляжево-дюнные; 6 – ландшафты, созданные устьевыми процессами, дельтовые; 7 – ветланды аккумулятивных террас южной части; 8 – аккумулятивные террасы южного склона, созданные волновыми процессами, пляжевые; 9 – аккумулятивные террасы южной части с техногенно-измененными берегами.

Ландшафты возвышенностей и склонов на структурно-денудационном рельефе и впадин на аккумулятивном рельефе: 10 – структурно-денудационные склоны, скальные береговые обрывы; склоны сложены коренными породами и валунной мореной; 11 – межгрядовые ложбины; 12 – уступ склона на границе со шхерной частью; 13 – плоская мелководная равнина; 14 – впадины и ложбины с нефелитным накоплением; 15 – пологонаклонная холмисто-грядовая равнина; 16 – узкие эрозийные субаквальные долины; 17 – структурно обусловленные гряды северо-западной ориентировки, сложенные моренными отложениями, иногда – кристаллическими породами; 18 – широкие впадины с нефелитным накоплением, с наибольшими глубинами до 230 м; 19 – склоны структурно возвышенностей рифейских субвулканических силлов; 22 – впадины плоские на пологозалегающих породах рифея.

Ледниковые и озерно-ледниковые ландшафты на аккумулятивном рельефе: 23 – пологоволнистые и всхолмленные озерно-ледниковые равнины; 24 – погребенные долины; 25 – флювиогляциальные гряды – озы; 26 – пологоволнистая, участками холмистая, озерно-ледниковая равнина; 27 – плоские и слабонаклонные ледниково-озерные равнины на поздненевендских и кембрийских комплексах; 28 – относительно возвышенные холмы за счет развития моренных отложений; 29 – абразионно-аккумулятивные прибрежные пологонаклонные равнины, участками слабовсхолмленные; 30 – кольцевые структуры.

Римскими цифрами указаны номера ландшафтных районов.

Расположение ландшафтных районов акватории Ладожского озера: 1 – кольцевые структуры; 2 – границы ландшафтных районов (I – Северо-Ладожское шхерное побережье, II – Северо-Ладожский подводный склон, III – Северо-Ладожская впадина, IV – Валаамское дугообразное поднятие, V – Центрально-Ладожская холмистая равнина, VI – Восточно-Ладожская пологохолмистая равнина, VII – Восточно-Ладожское побережье, VIII – Свирское побережье, IX – Западно-Ладожское побережье, X – Южно-Ладожская пологоволнистая равнина, XI – Южно-Ладожское побережье).

Созданная цифровая модель донных ландшафтов Ладожского озера, представляющая простой в работе и доступный для постоянного редактирования инструмент, позволяет при наличии стандартного программного обеспечения в интегрированной форме хранить и использовать доступную информацию по состоянию дна Ладожского озера и вести учет топологических ландшафтных единиц разного уровня. В качестве основной ячейки хранения информации выбран полигон размером 1x1 км, положение которого соответствует разграфке топокарт в прямоугольной системе координат (Пулково-1942, зона 6). Номер каждого полигона уникальный и складывается из координат «х у» юго-западного угла ячейки, что позволяет оперативно извлекать информацию из атрибутивных таблиц в полевых условиях на участке работ. Следующим шагом совершенствования модели является создание эталонных участков (ячеек), характерных для выделенных типов ландшафтов. На этих участках основное значение имеют собственные данные, полученные при детальном наблюдении: замеры глубин с густым шагом, подробное изучение состава фаций донных осадков, состав и распределение биоты. Учитывается глубина и угол наклона дна по данным эхолотирования; литологический состав выделяемых фаций: коренная порода и ее разновидность, донные осадки и их разновидности, признаки гидродинамического воздействия. Анализируется состав и распределение биоты: макрофитов, зооперифитона, макро- и мейзообентоса. Некоторые результаты изучения эталонных участков были отражены в публикациях [Дудакова, Анохин, Дудаков, 2021; Подводные ландшафты островов..., 2021].

Информацию, полученную при детальном исследовании ячейки-эталона, можно экстраполировать на всю площадь распространения данного типа ландшафта с учетом особенностей мезорельефа. Примеры таких эталонных ячеек для квадратов x386y807, x400y833, x361y758, x477y687 приведены на рис. 5.9.

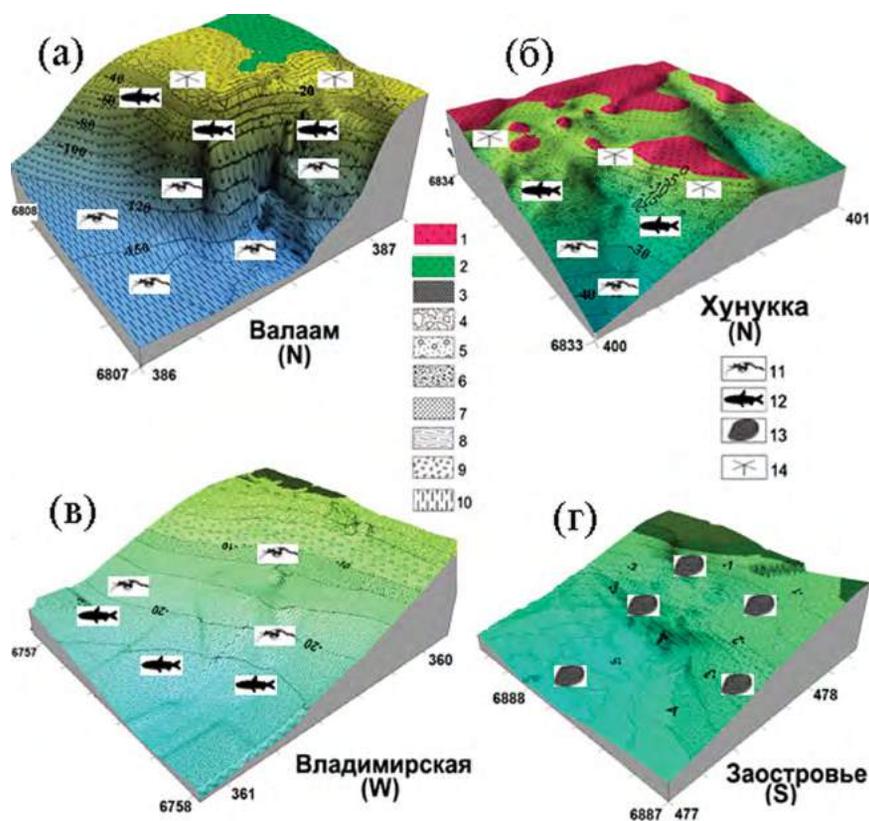


Рис. 5.9. Блок-диаграммы эталонных ячеек разных частей Ладожского озера ((а) – Валаамский архипелаг; (б) – северный шхерный район; (в) – западный берег; (г) – южный берег)

Литологические признаки. Коренные породы:

1 – граниты, 2 – габбро, 3 – осадочные породы суши; донные осадки: 4 – крупные валуны и глыбы, 5 – песчано-галечно-валунные, 6 – галька и щебенка, 8 – песок, 7 – песок со следами ряби, 9 – алевроиты; биотические признаки: 10 – мизиды и амфиподы, 11 – рыба, 12 – крупные моллюски, 13 – элодея, 14 – колонии губок

Разгрузка подземных вод в северной части Ладожского озера. Гипотеза о существовании зон разгрузки подземных вод на дне Ладожского озера возникла несколько десятилетий назад [Калесник, 1968], когда при анализе проб придонной воды в глубоких впадинах северной части озера были обнаружены некоторые химические и физические отличия воды из придонного слоя впадин от основной водной толщи. На дне и частично в бортах впадин геологическим картированием были зафиксированы рифейские осадочные породы [Амантов, 2014; Государственная геологическая карта..., 2016], в том числе песчаники, с которыми можно было сопоставить расположение водоносных горизонтов, приуроченных к аналогичным песчаникам на прилегающей суше.

Использования изотопных трассеров для уточнения условий формирования водного баланса и вещественного состава Ладожского озера является проблемой, которая поможет решить целый ряд экологических и экономических задач. Широкий спектр работ указывает на высокую эффективность подходов, базирующихся на исследовании водных объектов с помощью изотопных методов [Применение изотопных методов..., 2012]. Однако в России эти методы пока слабо освоены, а применительно к Ладожскому озеру начали использоваться с 2009 г. [Румянцев, Рыбакин, Токарев, 2017]. Результаты наших исследований основываются на информации о распространенности дейтерия ($\delta^2\text{H}$) и кислорода-18 ($\delta^{18}\text{O}$), относящихся к глобальным изотопным трассерам (environmental isotopes).

Предполагаемые выходы подземных вод на дне и их вклад в общий водный баланс Ладоги изучались и ранее, в результате этих исследований был определен район возможной интенсивной разгрузки подземных вод в северной части озера, идентифицированы подземные водоносные горизонты, по которым вода поступает в Ладогу, и получен ряд других предварительных сведений, позволивших определить методические приемы для осуществления настоящего исследования. По некоторым предположениям разгрузка подземных вод может быть достаточно интенсивной и существенно влиять на водный баланс Ладожского озера [Большаинов, 2018]. Этот вопрос является не только теоретическим но и социально-экономическим, так как Ладожское озеро является источником пресной воды для Санкт-Петербурга и прилегающих районов, от ее качества зависит жизнь миллионов людей. В течение нескольких последних лет специалисты ИНОЗ РАН в сотрудничестве с учеными других организаций (в частности, ААНИИ и СПбГУ) проводили исследования изотопного состава воды в глубоководной части Ладожского озера.

Выходы рифейских песчаников, содержащих водоносные горизонты, на дне Ладожского озера сосредоточены в основном в северной его части, в зоне между северным побережьем и островом Валаам [Румянцев, Рыбакин, Токарев, 2017]. На рис. 5.10 показан механизм разгрузки подземных вод из песчаников рифейского водоносного комплекса (рис. 5.10а) и поверхность склона дна на глубине 150 м с обнажением рифейских пород, полученная с помощью многолучевого эхолота EM2040 Kongsberg Maritime AS (рис. 5.10б). При этом идентифицировать подземную воду, выходящую в водную толщу озера, можно несколькими способами, например, по отличиям в минеральном составе, электропроводности и др.

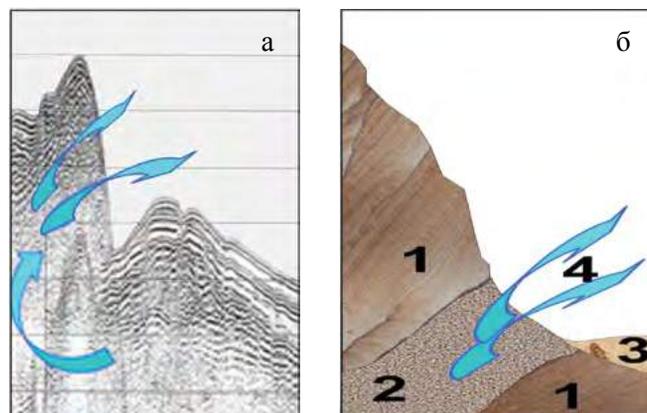


Рис. 5.10. Сейсмоакустический разрез в северной глубоководной части Ладожского озера, пересекающий выход подземных вод в основании сбросового уступа на дне (а), синими стрелками даны предполагаемые потоки разгрузки воды из обнажения водоносного горизонта. Интерпретация механизма разгрузки подземных вод из песчаников рифейского водоносного комплекса: 1 – четвертичные отложения, 2 – рифейские водоносные песчаники, 3 – четвертичные отложения, 4 – вода из рифейских песчаников (б)

На рис. 5.11 показана поверхность склона дна на глубине 150 метров с обнажением рифейских пород в месте разгрузки подземных вод, полученная с помощью многолучевого эхолота EM 2040 Kongsberg Maritime AS(б). Идентифицировать подземную воду, выходящую в водную толщу озера, можно несколькими способами – по отличиям в минеральном составе, электропроводности и др.

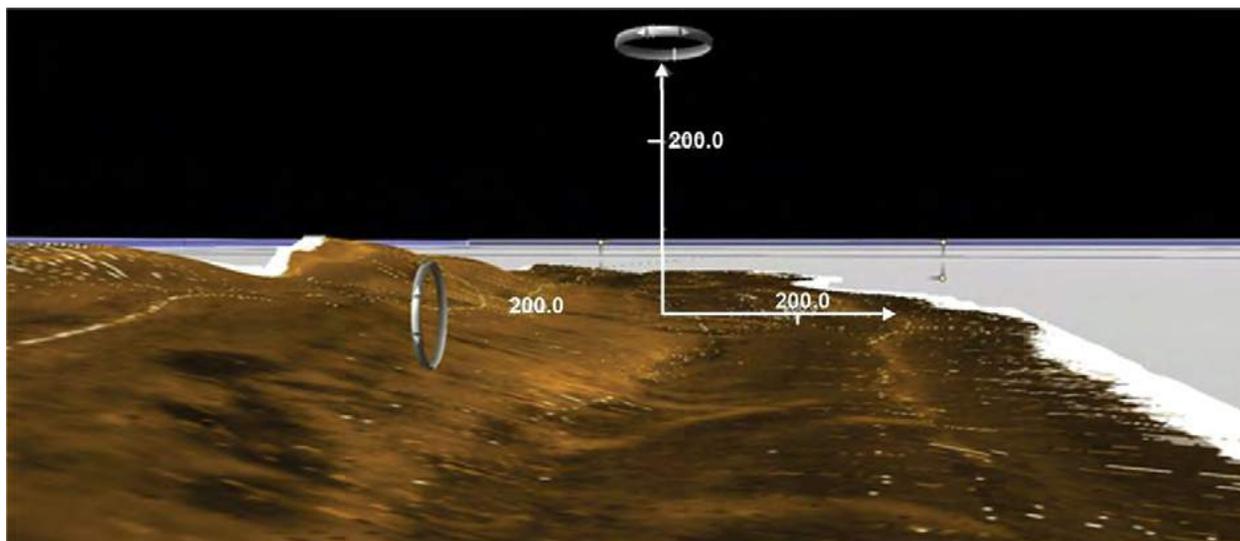


Рис. 5.11. Поверхность склона дна на глубине 150 метров с обнажением рифейских пород в месте разгрузки подземных вод, полученная с помощью многолучевого эхолота EM 2040 Kongsberg Maritime AS(б)

Следует отметить, что вода в Ладожском озере демонстрирует постепенное повышение минерализации, что видно из хронологического графика на рис. 5.12. Возможно, что такой рост может быть вызван не только усилением антропогенного воздействия, но и увеличением доли засоленных подземных вод (регионального стока глубокой циркуляции) в химическом балансе озера [Tokarev, Rumyantsev, Rybakin, Yakovlev, 2022].

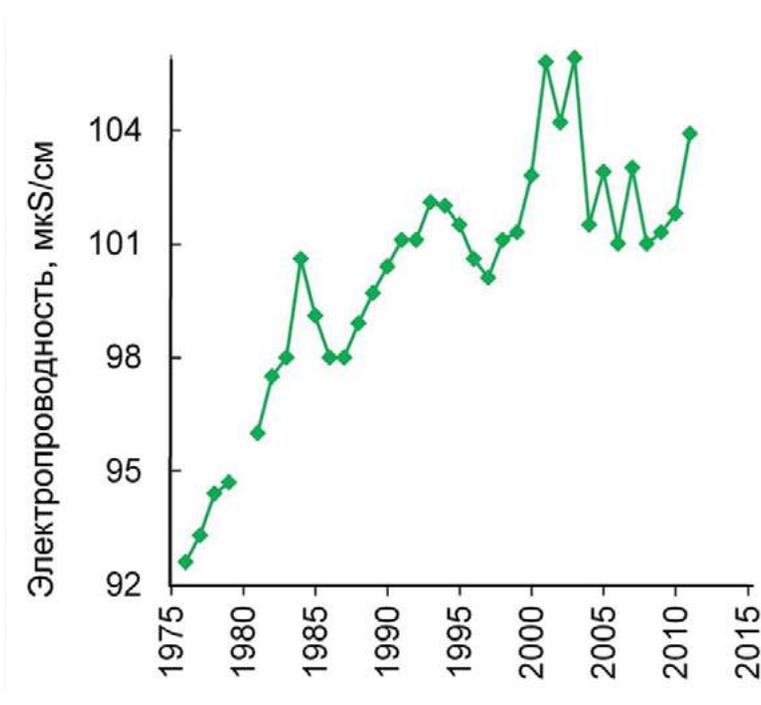


Рис. 5.12. Электропроводность воды в Ладожском озере в 1976–2015 гг.

Авторы использовали следующую методику проведения работ с изотопными индикаторами. На первом этапе отбирали пробы воды по глубине и строили графики изменения концентрации изотопов по вертикали (рис. 5.13). Подземная вода, не имея непосредственного контакта с атмосферным воздухом, обычно обеднена стабильными изотопами кислорода и водорода, и их отрицательные аномалии в придонной воде Ладоги с высокой степенью вероятности связаны с выходами подземных вод. Поэтому в дальнейшем, для локализации этих выходов, был применен придонный водный пробоотбор с последующим изотопным анализом проб на содержание изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерия $\delta^2\text{H}$.

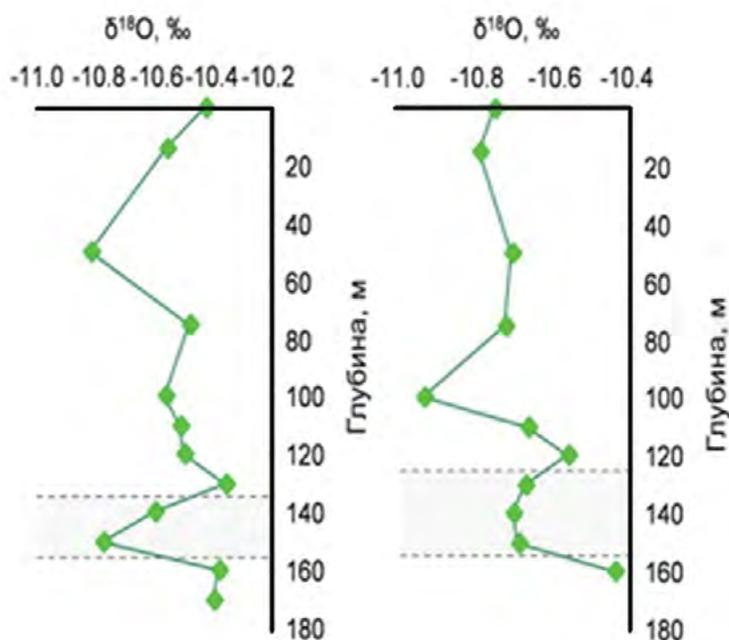


Рис. 5.13. Изотопный состав кислорода в толще воды Ладожского озера (между станциями 105 и 109 в августе 2015 года) серая область – глубина предполагаемой разгрузки подземных вод

Район отбора проб был определен, исходя из расположения выходов рифейских песчаников на дне Ладожского озера, предположительно являющихся основным водоносным горизонтом, и по предварительно определенному району распространения общей аномалии содержания стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерия $\delta^2\text{H}$ в северной части озера. Рельеф дна в этом районе весьма пересеченный, глубины достигают 100–200 м.

Отбор водных придонных проб проводился батометром Нансена с различных плавсредств, в том числе НИС «Полярник», НИС «Посейдон» и НИС «Протей». Сеть отбора проб, будучи на первых этапах относительно равномерной по акватории, от сезона к сезону наращивалась и сгущалась вокруг выявляемых частных изотопных аномалий. К концу последнего сезона 2022 г. общее количество станций составило 188. Эти пробы были подвергнуты лазерному изотопному анализу в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

Пробы подвергнуты лазерному изотопному анализу в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ. По результатам изотопного анализа определены пробы с аномально низкими содержаниями изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерия $\delta^2\text{H}$, которые и определяют места разгрузки. Выходы водоносных горизонтов на дне озера, вероятно, связаны с особенностями рельефа дна – скорее всего с наиболее крутыми склонами. Поэтому следующим шагом была привязка положения проб к высококачественной батиметрической основе, созданной на основе цифровой модели рельефа. В результате были построены схемы аномально низких содержаний изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в придонной воде. Эта схема была наложена на батиметрическую карту северной части Ладожского озера, что позволило составить схему выходов подземных вод на дне в северной части Ладожского озера (рис. 5.14).

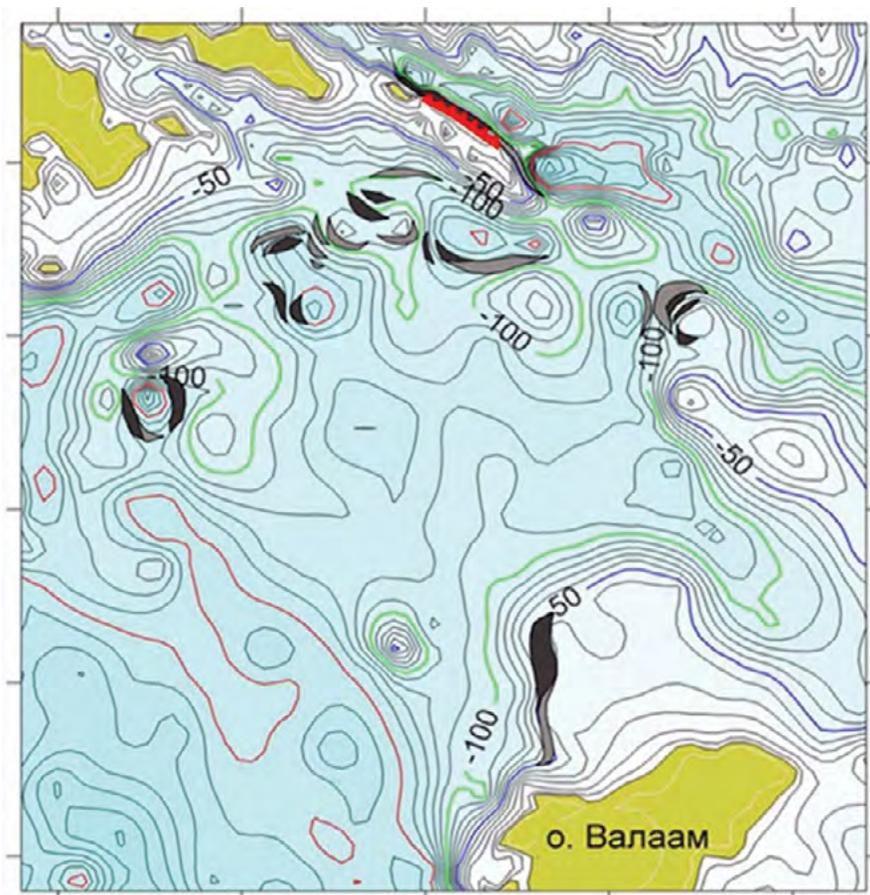


Рис. 5.14. Схема расположения мест выходов подземных вод на дне северной части Ладожского озера

Темно-серая заливка на рис. 5.14 соответствует участкам с более интенсивным выходом подземных вод, светло-серая заливка – участкам с менее интенсивным выходом. Красная зубчатая линия – субвертикальный тектонический уступ в районе о. Мустааари. Батиметрия участка построена на основании ЦМР Д.С. Дудаковой и С.Н. Юдина [2022], изобаты даны через 10 м. На схеме видно, что выходы подземных вод приурочены в основном к склонам и седловинам рельефа дна, к склонам подводных впадин. В плане эти выходы представляют собой удлиненные участки склонов длиной 0,5–6 км, шириной 100–800 м, изогнутые в соответствии с их простираем. Перепады глубин на отдельных выходах составляют 10–20 м. Весь диапазон глубин, в котором расположены выходы подземных вод от 40 до 130 м, но основное количество выходов расположено на глубинах 100–130 м. По большей части выходы подземных вод группируются в северной части участка исследований на склонах подводных возвышенностей и в желобах. Наиболее значимым представляется самый северный выход, расположенный в желобе северо-западного простираения в районе о. Мустааари. Это самый протяженный выход, подтвержденный результатами изотопного анализа и наличием на юго-западном склоне желоба субвертикального тектонического уступа, в основании которого, вероятно, и обнажаются водоносные рифейские песчаники. Несколько выбивается из общей картины выход подземных вод в районе о. Валаам, приуроченный к западному склону подводного плато с поверхностью на глубине около 40 м. Это наименее глубоководный выход, расположенный между глубинами 40–60 м. Еще серия небольших выходов мелкого расположения отмечается в восточной части участка исследований, занимая диапазон глубин 60–80 м на северо-западном склоне небольшой изометричной возвышенности.

Таким образом, исследования подтвердили гипотезу о существовании зон разгрузки подземных вод на дне Ладожского озера. Удалось показать, что аномальные концентрации стабильных изотопов кислорода и водорода приурочены к породам рифейского водоносного комплекса. Обнажения пород рифейского водоносного комплекса найдены на поверхности дна Ладожского озера

и на его подводных склонах вдоль северного и восточного побережий, а также в двух глубоководных впадинах. В литературе часто предлагается в дальнейшем использовать воды рифейского водоносного комплекса, которые поступают в Ладожское озеро в качестве источника «сверхчистого» водоснабжения, поскольку они защищены от всех видов техногенного воздействия. Однако, остается открытым вопрос, насколько «чистыми» являются воды из рифейских отложений, поступающие в Ладогу, поскольку они более минерализованы, чем ладожская вода, и могут содержать значительное количество наночастиц [Применение изотопных методов..., 2012; Румянцев, Рыбакин, Токарев, 2017].

В перспективе данные исследования будут продолжены. При дальнейшем наращивании сети опробования и все более подробной локализации выходов подземных вод станет возможным крупномасштабное картирование этих выходов. В предстоящем сезоне предполагается применение подводной фотовидеосъемки для изучения выходов подземных вод в коренных уступах дна северной части Ладоги. Также будут продолжены работы на водосборе Ладожского озера с целью исследования условий формирования баланса водных масс на основе данных об изотопном составе воды [Токарев, Румянцев, Рыбакин, Яковлев, 2022]. Предполагается также привлечение данных о положении тектонических разломов в этом районе, так как разломы, рассекая водоносные горизонты, скорее всего, существенно влияют на положение и состояние мест разгрузки подземных вод [Амантов, 2014; Анохин, Науменко, Нестеров, 2016; Ассиновская, 2005].

Глава 6

ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР

По своей численности и разнообразию малые озера существенно превосходят озера большие. Изменения, происходящие на водосборах малых озер, намного быстрее и часто в более заметной степени отражаются на показателях озерных экосистем. На начальном этапе развития лимнологии основное внимание уделялось изучению влияния природных факторов на формирование качественных и количественных показателей, характеризующих озерную экосистему, однако, начиная с 1970-х гг., акцент сместился в сторону оценки последствий антропогенного воздействия [Антропогенное воздействие на малые..., 1980; Антропогенные изменения экосистем..., 1991; Никаноров, 2008; Россолимо, 1977; Northern European Lake Survey, 1998]. Общеизвестно, что любое антропогенное вмешательство в естественный ход функционирования экосистем водоемов приводит к его нарушению, что, как правило, негативно отражается на качестве воды и проявляется на всех компонентах водных экосистем. Под действием различных антропогенных факторов в озерах развиваются процессы загрязнения, эвтрофирования и закисления. При этом скорость ответной реакции озерных экосистем на антропогенное воздействие и количественные показатели антропогенной трансформации озер, имеющих различные природные характеристики, будут отличными.

6.1 Исследование малых озер и озерно-речных систем бассейна Ладожского озера и Финского залива

В период 2013–2018 гг. в рамках темы «Развитие теории и практики исследований, оценки экологических и социально-экономических последствий эвтрофирования и антропогенных трансформаций разномасштабных пресноводных водоемов» было выполнено исследование *«Оценка трансформации озерных экосистем Северо-Запада России под воздействием природных и антропогенных факторов»*. Цель исследования заключалась в выявлении закономерностей и особенностей антропогенных трансформаций озер под воздействием различных антропогенных факторов в условиях различных геохимических ландшафтов. Таким образом, ландшафтный подход к изучению озер, применявшийся в исследованиях Института еще с начала 60-х гг. прошлого века, получил дальнейшее развитие. Сравнительно-лимнологические исследования выполнялись сотрудниками Института: к.б.н. Виктором Павловичем Беляковым, к.г.н. Натальей Викторовной Игнатъевой, к.б.н. Александром Геннадьевичем Русановым, к.б.н. Еленой Владимировной Станиславской, Анной Леонидовной Афанасьевой, Наталией Владимировной Родионовой, Александрой Ивановной Бажора, Денисом Сергеевичем Бардинским, Тамарой Михайловной Дорогиной, Людмилой Ильиничной Суворовой, Валерией Александровной Щербак.

На 22 озерах, расположенных в соответствии с классификацией и ландшафтным районированием Ленинградской области [Исаченко, 1983] в 8 ландшафтах – 6 разнотипных ландшафтах Карельского перешейка, на Ижорской возвышенности и в бассейне р. Свири, были выполнены комплексные сравнительно-лимнологические исследования, в ходе которых изучалась сезонная динамика основного набора гидрохимических показателей и характеристик гидробиоценозов. В каждом из 8 ландшафтов были выбраны существенно различающиеся по степени антропогенного воздействия озера:

- в сельговом ландшафте Северо-Западного Приладожья – озера Большое Заветное и Шущинское;
- в Приозерском ландшафте озерно-ледниковых песчаных равнин – озера Судаковское и Воробьево;
- в северной части камово-озерно-ледникового ландшафта Лемболовской возвышенности – озера Мичуринское и Берестовое;
- в южной части камово-озерно-ледникового ландшафта Лемболовской возвышенности – озера Затишье, Малое Луговое, Силанде, Гупуярви, Ройка, Медное;

- в Приморском ландшафте озерно-ледниковых песчаных равнин – озера Нахимовское и Красногвардейское;
- в ландшафте ледниковых заболоченных глинистых равнин Приневской низины – озера Длинное и Большое;
- в ландшафте известняковых карстовых плато Ижорской возвышенности – озера Дудергофское, Долгое, Безымянное, Белое;
- в ландшафте холмисто-моренных возвышенностей Олонецкой гряды – озера Вачозеро и Пидьмозеро.

Расположение озер представлено на рис. 6.1.



Рис. 6.1. Карта-схема расположения исследованных озер

Примечание – озера: 1 – Большое Заветное, 2 – Шушинское, 3 – Судаковское, 4 – Воробьево, 5 – Берестовое, 6 – Мичуринское, 7 – Затишье, 8 – Малое Лозовое, 9 – Силанде, 10 – Гупуярви, 11 – Ройка, 12 – Медное, 13 – Красногвардейское, 14 – Нахимовское, 15 – Большое, 16 – Длинное, 17 – Безымянное, 18 – Долгое, 19 – Дудергофское, 20 – Белое, 21 – Вачозеро, 22 – Пидьмозеро

В результате исследования установлено, что особенности ландшафтов прежде всего сказываются на формировании гидрохимического режима озер [Игнатьева, 2018]. В пределах одного ландшафта минерализация озерных вод может различаться почти на порядок, при этом озерные воды семи ландшафтов характеризуются как ультрапресные и только воды озер, расположенных в ландшафте известняковых карстовых плато Ижорской возвышенности, классифицированы как воды с относительно повышенной минерализацией (рис. 6.2а). Низкая минерализация, не обеспечивающая высокой буферной емкости, предопределяет повышенную уязвимость озерных вод по отношению к внешним негативным воздействиям. Установлено, что в пределах одного ландшафта более минерализованными являются воды озер, испытывающих большую антропогенную нагрузку.

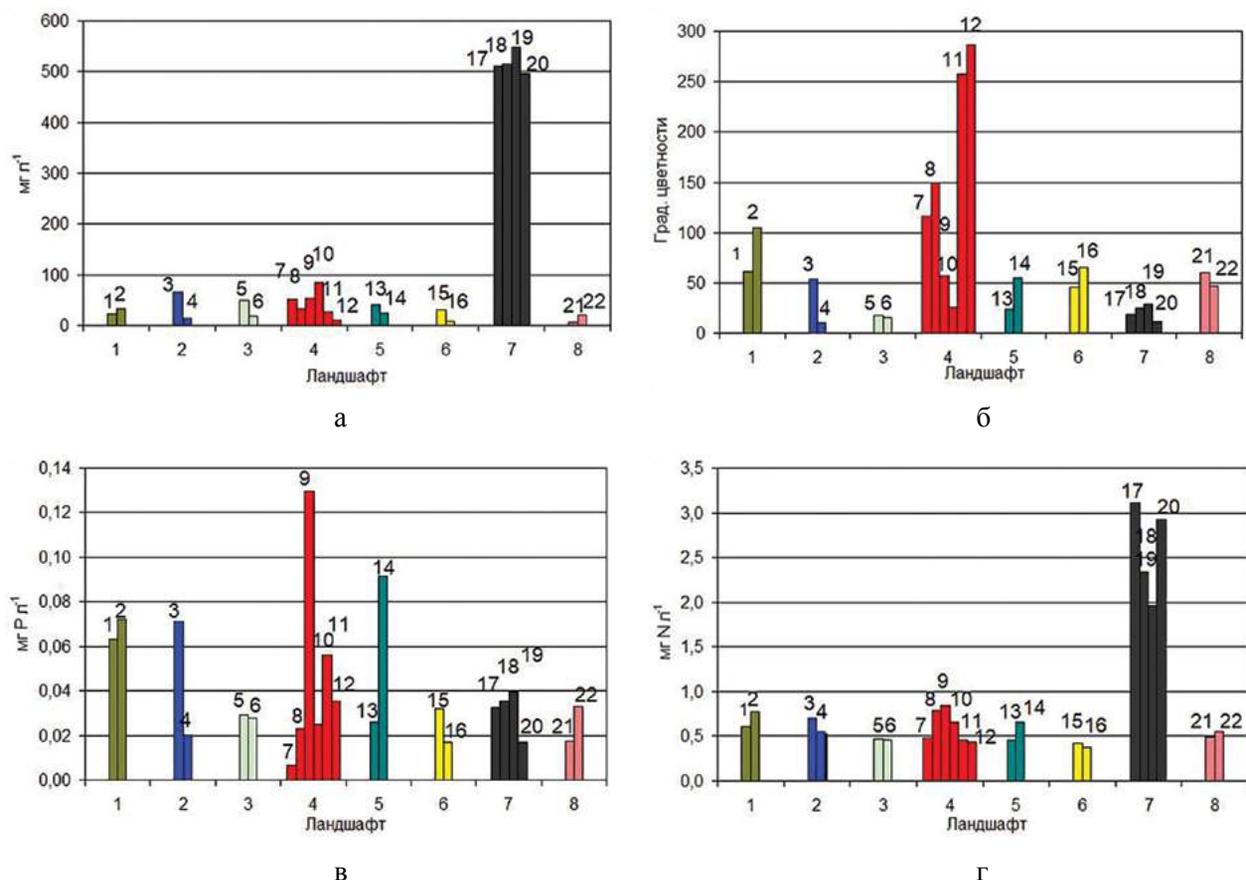


Рис. 6.2. Осредненные значения суммы главных ионов (а), цветности (б), содержания общего фосфора (в) и общего азота (г) в воде исследованных озер различных ландшафтов.

Ландшафты: 1 – сельговый ландшафт Северо-Западного Приладожья; 2 – Приозерский ландшафт озерно-ледниковых песчаных равнин; 3 – Лемболовский камово-озерно-ледниковый ландшафт (северная часть); 4 – Лемболовский камово-озерно-ледниковый ландшафт (южная часть); 5 – Приморский ландшафт озерно-ледниковых песчаных равнин; 6 – ландшафт ледниковых заболоченных глинистых равнин Приневской низины; 7 – ландшафт известняковых карстовых плато Ижорской возвышенности; 8 – ландшафт холмисто-моренных возвышенностей Олонекской гряды.

Озера: 1 – Большое Заветное; 2 – Шушинское; 3 – Судаковское; 4 – Воробьево; 5 – Мичуринское; 6 – Берестовое; 7 – Затишье; 8 – Малое Лозовое; 9 – Силанде; 10 – Гупуярви; 11 – Ройка; 12 – Медное; 13 – Нахимовское; 14 – Красногвардейское; 15 – Длинное; 16 – Большое; 17 – Дудергофское; 18 – Долгое; 19 – Безымянное; 20 – Белое; 21 – Вачозеро; 22 – Пидьмозеро

По соотношению главных ионов 50 % исследованных озерных вод классифицированы как гидрокарбонатно-кальциевые, то есть являются типичными для Северо-Западного региона России [Алекин, 1970]. Для озер, расположенных на Ижорской возвышенности, характерны гидрокарбонатно-магниевые воды. Доминирование в ионном составе воды нескольких озер разных ландшафтов ионов Cl^- и Na^+ может быть как природной особенностью, связанной с поступлением подземных вод, так и признаком загрязнения хозяйственно-бытовыми сточными водами. В целом, основной ионный состав воды исследованных озер формируется, главным образом, под воздействием природных факторов.

Органическое вещество в водах озер, расположенных в пределах одного ландшафта, может существенно различаться как по количественным, так и по качественным характеристикам. Наименьшее его количество обнаружено в исследованных озерах Центрального плато Карельского перешейка (Лемболовского камово-озерно-ледникового ландшафта) и карбонатных озерах, расположенных на Ижорской возвышенности (в пределах ландшафта известняковых карстовых плато). При этом на содержание легкоокисляемого органического вещества ландшафтные особенности водосборов озер не оказывают прямого влияния. Высокое его содержание отмечено в озерах разных ландшафтов, характеризующихся высокой биологической продуктивностью и испытывающих воздействие со стороны населенных пунктов. Для ряда высокоцветных озер – Затишье, Малое Лозовое, Ройка, Мед-

ное (рис. 6.2б), принадлежащих Верхне-Охтинскому ландшафту моренных заболоченных равнин, характерно природное закисление вод, обусловленное поступлением большого количества органического вещества (главным образом, гумусовых соединений) из заболоченных участков водосборных территорий. В оз. Большом, расположенном в Приневской низине в ландшафте озерно-ледниковых заболоченных равнин, выявлено развитие процесса антропогенного закисления [Игнатьева, 2018], характерными признаками которого являются постоянно пониженные значения водородного показателя ($pH < 5,6$), высокое содержание сульфатов при крайне низком содержании гидрокарбонатов, высокая прозрачность воды и низкое содержание взвесей [Комов, Лазарева, Степанова, 1997; Моисеенко, 2003].

В результате изучения сезонной динамики главнейших биогенных элементов – фосфора и азота, установлено, что содержание фосфора в воде озер зависит, главным образом, от уровня внешней биогенной нагрузки, определяемой характером и степенью антропогенного воздействия, а также размером водосбора. Ландшафтная принадлежность озера играет в этом второстепенную роль. Озера с примерно равным, низким содержанием фосфора, есть в каждом изученном ландшафтном районе (рис. 6.2в). Среди исследованных озер экстремальные концентрации фосфора обнаружены в озерах Карельского перешейка Затишье (наименьшая) и Силанде (наибольшая), расположенных в Верхне-Охтинском ландшафте моренных заболоченных равнин. Содержание азота, напротив, определяется в основном ландшафтной принадлежностью озер, то есть природными факторами (рис. 6.2г). Для большей части исследованных озер различных ландшафтов характерно фосфорное лимитирование первичного продуцирования. Наибольшим избытком азота отличается оз. Затишье ($N/P = 74$) и озера, расположенные в ландшафте известняковых карстовых плато Ижорской возвышенности ($N/P = 50 \div 173$), что следует считать природной особенностью данного ландшафта.

Установлено, что ландшафтные особенности оказывают влияние на условия аэрации, а также интенсивность и соотношение продукционно-деструкционных процессов в водной массе озер, что проявляется в устойчивом недонасыщении кислородом поверхностного слоя воды высокоцветных озер и существенном перенасыщении кислородом воды карбонатных озер, расположенных на Ижорской возвышенности.

Основными факторами, определяющими формирование гидробиологического режима в озерах различных ландшафтов, являются эвтрофирование, гумификация и ацидификация их вод. Структуру и продуктивность сообществ фитопланктона определяют морфометрия водоемов, уровень поступления биогенных элементов, прежде всего фосфора, и характер антропогенного воздействия [Трифорова, Афанасьева, Русанов, 2016]. Состав, структура и уровень биомассы летнего фитопланктона хорошо отражают трофический статус озер [Трифорова, Афанасьева, Русанов, 2014]. В эвтрофных озерах большинства ландшафтов при обогащении фосфором повышается биомасса фитопланктона и роль в ней сине-зеленых водорослей [Трифорова, Афанасьева, 2017]. В менее продуктивных озерах всех ландшафтов состав фитопланктона более разнообразен, здесь отмечались виды всех отделов водорослей, но уровень биомассы был намного ниже, чем в эвтрофных озерах [Трифорова, Афанасьева, Макарецова, 2016]. В озерах заболоченных ландшафтов с повышенной цветностью, таких, как Медное, Ройка, Затишье, Малое Лозовое увеличивается количество миксотрофных форм, отмечается доминирование рафидофитовых водорослей, прежде всего *Gonyostomum semen*. Наименее разнообразен и продуктивен фитопланктон кислотных озер М. Лозовое, Большое и другие [Корнева, 2014; Трифорова, Афанасьева, 2015]. Сезонные наблюдения на озерах разных ландшафтов позволили установить, что динамика фитопланктона в течение вегетационного сезона очень разнообразна. Сходной сезонной динамикой выделяются лишь озера с повышенной минерализацией, расположенные на Ижорском плато, где максимальное развитие планктона приходилось на весну, до массовой вегетации харовых и зеленых нитчатых водорослей.

В результате исследования перифитона озер различных ландшафтов, установлено, что структурно-функциональные показатели этого сообщества в определенной степени зависят от трофического статуса озер и степени их гумификации, а также связаны с морфометрией и зарастанием высшей водной растительностью, и лишь опосредованно связаны с типом ландшафта [Станиславская, 2014; Русанов, Станиславская, 2022]. Сезонные наблюдения позволили выявить, что немаловажным фактором, влияющим на функционирование прикрепленных сообществ, являются погодные усло-

вия разных лет, поскольку динамика сообществ отличается по годам. В процессе эвтрофирования и гумификации озер в перифитоне происходят, прежде всего, структурные перестройки, в результате чего видовой состав водорослей, структура, комплекс доминирующих видов и видовое разнообразие могут значительно различаться [Станиславская, 2017]. По мере повышения уровня трофии и степени антропогенного воздействия в составе перифитона вместо видов, характерных для чистых вод, начинают преобладать виды, предпочитающие воды, обогащенные биогенными элементами и органическими веществами, а также виды широкого экологического спектра. Такие перестройки происходят в озерах, расположенных в любых ландшафтах. В озерах с высокой цветностью и пониженным рН воды формируется достаточно специфическая альгофлора перифитона, которая имеет некоторые отличия в разных ландшафтных районах, но, как правило, общим является снижение видового разнообразия обрастаний [Станиславская, 2018а; 2018б]. Наблюдения за перифитоном более минерализованных, зарастающих озер Ижорского плато также позволили выявить особенности прикреплённых водорослей в них. Количественные характеристики перифитона в разнотипных озерах изменяются в широких пределах в озерах всех ландшафтов. Однако четкой связи количественного развития водорослей перифитона с трофическим статусом озер и степенью гумификации выявить не удалось [Станиславская, Афанасьева, 2019].

Видовой состав макрофитов исследованных озер также достоверно может отражать их трофический статус. Олигомезотрофные озера характеризуются развитием подводного яруса макрофитов, в который входят придонные растения, чувствительные к повышенным концентрациям биогенных веществ [Classifying aquatic macrophytes..., 2008]. С увеличением содержания биогенных элементов продуктивность и распространение ценозов придонных растений значительно падает, как в озерах Воробьево и Берестовое, где единичные придонные растения встречаются в изреженном поясе гелофитов. В мезотрофных светловодных озерах (Пидьмозеро, Нахимовское, Большое Заветное, Гупуярви) прибрежные заросли разнообразных гелофитов обрамлены полосой широколистных рдестов и небольшими пятнами растений с плавающими листьями. Для водной растительности мезо-эвтрофных и эвтрофных озер (Мичуринское, Судаковское, Красногвардейское, Силанде) характерно доминирование укореняющихся растений с плавающими листьями и гелофитов. Крупнолистные рдесты и уруть колосистая, составляющие основу погруженного яруса растительности, ограничены в распространении мелководьями прибрежной полосы вследствие снижения прозрачности воды [Toivonen, Huttunen, 1995]. В гиперэвтрофных озерах с дальнейшим снижением прозрачности воды и развитием фитопланктона обилие и видовое богатство погруженных растений сильно сокращается. Высокая концентрация гуминовых кислот, придающая воде желтоватый или коричневый цвет, приводит к недостатку освещенности водной толщи и дна, лимитируя развитие погруженных растений. В отдельную группу выделяют водоемы с высокой минерализацией и карбонатностью вод (оз. Белое, Дудергофское). Минерализация воды, как действующий фактор для растительных сообществ, проявляется в снижении биодоступности фосфора в высокоминерализованных озерах вследствие соосаждения фосфатов при седиментации карбоната кальция. Для этих озер характерно массовое развитие нитчатых и харовых водорослей и развитие ценозов укореняющихся погруженных растений, которые отличаются высокой продуктивностью, благодаря доступу к минеральным ресурсам, накопленным в донных осадках [Willby, Abernethy, Demars, 2000].

Изучение планктонных простейших в разнотипных водоемах показало, что им принадлежит различная роль в формировании структуры планктонного сообщества, а их функциональное значение меняется в зависимости от особенностей озера [Хлебович, 1997]. Так, для кислотных олиготрофных водоемов отмечено наименьшее видовое разнообразие и слабое развитие инфузорий, для гумифицированных, мезотрофных озер характерно значительное видовое разнообразие, а их биомасса почти равна биомассе всего зоопланктона. В эвтрофных водоемах, с одним летним максимумом численности и биомассы протозойного планктона, обычно доминируют один-два вида простейших из среднеразмерной фракции, которые могут создавать более половины всей продукции простейших. В мезотрофных озерах обычно наблюдается два пика развития простейших – весенний и летний, в них слабо выражена вертикальная неоднородность размерной структуры сообщества [Хлебович, 2001].

Для сообществ зоопланктона и зообентоса видовой состав, в целом, не характеризует специфику озер отдельных ландшафтов, поскольку большинство массовых видов их современной фауны имеют широкий диапазон адаптаций к различным условиям среды [Беляков, Бажора, 2016а; 2016б]. Различия озер разных ландшафтов можно выявить на основе встречаемости видов второго ряда или редких видов в фаунистических списках. Средневзвешенные количественные и продукционные характеристики гетеротрофных сообществ определяются трофическим уровнем озер и их морфометрией, вне зависимости от типа ландшафта, но структура и, частично, количественное развитие зообентоса в литоральной зоне зависят от характеристик биотопа, а, следовательно, и от особенностей ландшафта. Для зоопланктона и зообентоса исследованных озер характерна зависимость от развития других биологических сообществ. Связь зообентоса, и частично зоопланктона озер по составу, структуре и количественному развитию с особенностями ландшафтов прослеживается через действие таких факторов, как минерализация и гумификация вод. [Беляков, Бажора, 2018].

Сезонная динамика сообществ различается в озерах разных ландшафтов. В озерах, где проявляются крайние значения природных факторов, или максимальное антропогенное воздействие, отмечается, в частности, спад количественного развития зообентоса в середине лета, а максимум приходится на весну, или осень. Основные факторы среды, такие как температурный и водный режим, определяющие межгодовые различия условий количественного развития зообентоса, действуют в озерах разных ландшафтов, не подверженных существенной антропогенной нагрузке.

Исследование трансформации экосистем водоемов бассейна Ладожского озера и прилегающих территорий под воздействием эвтрофирования и климатических флуктуаций было продолжено в 2018 г. в рамках темы «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов». Выполненное исследование позволило дать комплексную оценку современного экологического состояния ряда малых рек и озер бассейна Ладожского озера, оценить их способность к самоочищению, а также степень их влияния на нижележащие озерные системы и, в конечном итоге, Ладожское озеро. К участникам исследовательской группы добавились Мария Андреевна Гусева, Анна Дмитриевна Старухина, Антон Викторович Терехов.

В качестве объектов исследования выбраны озерно-речные системы западного побережья Ладожского озера, расположенные в различных геохимических ландшафтах [Исаченко, 1983]. В разные годы были исследованы:

- р. Авлога с озерами Мадалаярви и Воляярви (озерно-ледниковые заболоченные песчаные равнины Южно-Приладожского ландшафта);
- р. Морье с оз. Хепоярви и руч. Лепсари (озерно-ледниковые заболоченные песчаные равнины Южно-Приладожского ландшафта);
- р. Вьюн (камово-озерно-ледниковый ландшафт Лемболовской возвышенности; озерно-ледниковые песчаные равнины Приозерского ландшафта);
- водотоки системы р. Вуоксы (реки Булатная, Сосновка, Лосевка, ручьи Тихий и Щучий) (озерно-ледниковые песчаные равнины Привуоксинского и Приозерского ландшафтов; камово-озерно-ледниковый ландшафт Лемболовской возвышенности);
- оз. Нарядное – р. Сёмужья (озерно-ледниковые песчаные равнины Приозерского ландшафта);
- озера Гусиное и Болотное – руч. Прозрачный (озерно-ледниковые песчаные равнины Приозерского ландшафта).

Схемы расположения станций отбора проб в 2019–2022 гг. представлены на рис. 6.3. В 2023 г. начато исследование озерно-речных систем, принадлежащих сельговому ландшафту Северо-Западного Приладожья – озер Узкого, Центрального, Лопастного и руч. Черного.

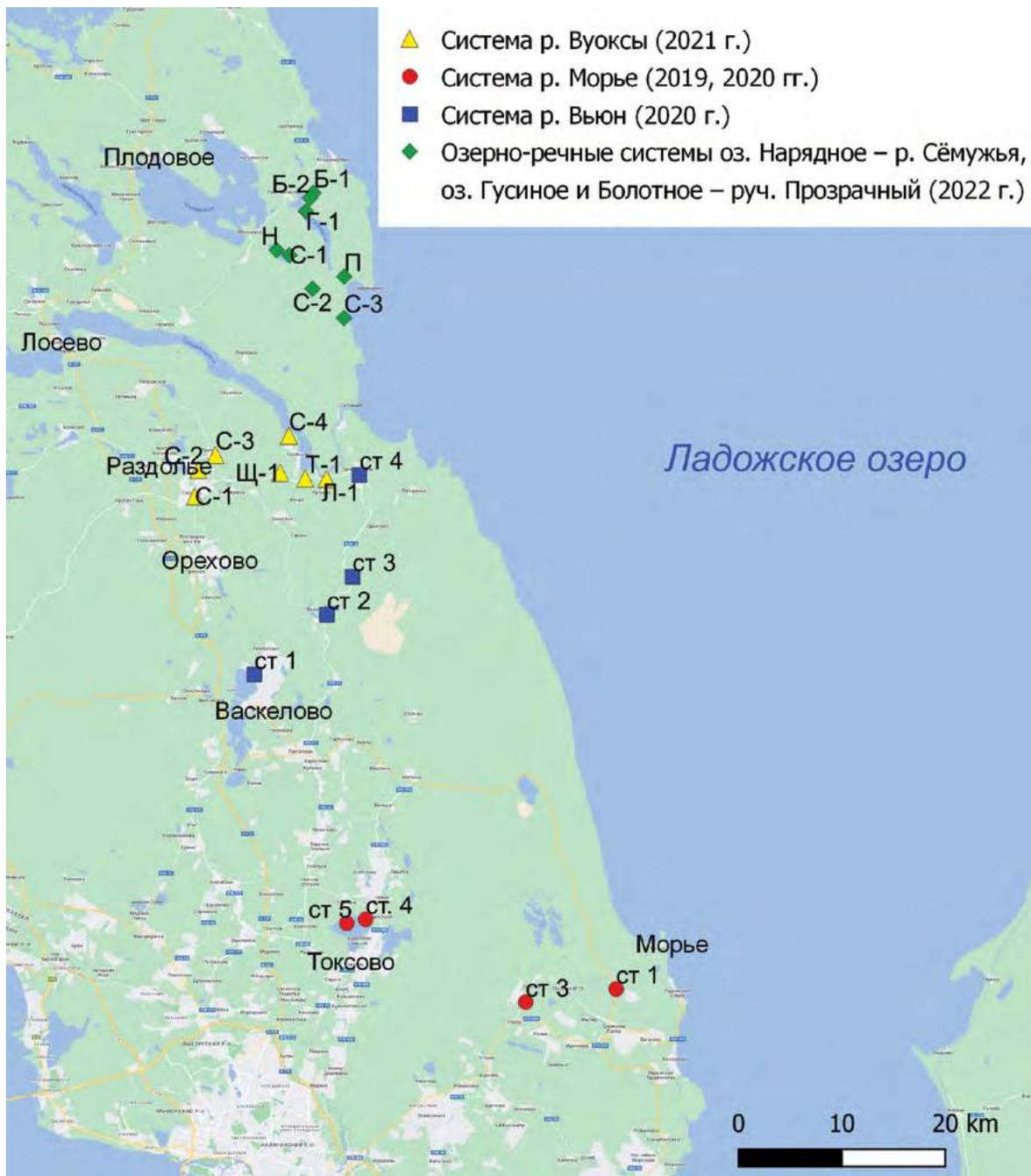


Рис. 6.3. Схема расположения станций отбора проб различных озерно-речных систем в 2019–2022 гг.

Комплексные исследования, выполненные на ряде озерно-речных систем западного побережья Ладожского озера в период открытой воды, позволили выявить ряд закономерностей и особенностей гидрохимического и гидробиологического режимов и на качественном уровне оценить вклад природных и антропогенных факторов в их формирование.

Сравнение трех изученных в 2019–2020 гг. водных систем – на рр. Авлоге, Морье, Вьюне, показало, что процент антропогенно трансформированных территорий выше на водосборе р. Авлоги, что, вероятно, определяет наибольшую антропогенную нагрузку на ее систему. Другим фактором, влияющим на экологическое состояние рек, является вынос гуминовых веществ, который выше там, где больше площадь заболоченных территорий и вырубленных лесов. Водосбор р. Морье в большей степени подвержен мелиоративной трансформации в связи с торфоразработками и поэтому там выше эрозия и вынос гуминовых веществ.

В результате исследования гидрохимических характеристик водных систем рек Морье, Вьюна и Авлоги установлено, что отдельные участки исследованных водных систем неоднородны по степени минерализации. Из трех рек наименее минерализованные воды приносит в Ладожское озеро р. Вьюн, наиболее минерализованные – р. Авлога. Отличия в степени минерализации водных систем обусловлены, главным образом, действием природных факторов. В анионном составе водных систем доминируют гидрокарбонаты, исключением является оз. Воляярви в системе р. Авлоги, в котором постоянно доминируют хлориды. В катионном составе водных систем рек Авлоги и Морье в основном доминирует кальций, в р. Вьюн осенью 2020 г. был отмечен неустойчивый катионный состав – смена доминирующего катиона вниз по течению в ряду $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+$. Относительно высокие концентрации хлоридов и ионов натрия в воде могут быть следствием антропогенного воздействия, в частности, поступления хозяйственно-бытовых сточных вод, однако, в данных водных системах повышенные концентрации этих ионов, очевидно, связаны в основном с природными особенностями – составом слагающих пород, даже на участках, явно подверженных антропогенному воздействию. Таким образом, значимого влияния антропогенного фактора на формирование основного ионного состава водных систем рек Авлоги, Морье и Вьюна не выявлено.

Из трех исследованных водных систем наименьшие значения концентрации органического вещества и цветности в нижнем течении характерны для р. Авлоги, наибольшие – р. Морье. Высокая цветность воды изучаемых водных систем обусловлена как заболоченностью отдельных участков водосборов (в наибольшей степени это относится к водосбору р. Морье), так и усилившимся выносом гуминовых веществ из почв вследствие антропогенного воздействия, в частности, сведения лесов. Высокое для периода открытой воды содержание свободной углекислоты свидетельствует об их экологическом неблагополучии.

Воды, содержащие наименьшие концентрации фосфора, несет в Ладожское озеро р. Вьюн, наибольшие – весной и летом р. Авлога, а осенью – р. Морье. Влияние водосбора на содержание фосфора в воде р. Вьюн не столь существенно практически на всем ее протяжении, тогда как обогащение вод р. Морье соединениями фосфора происходит, в основном, в ее нижнем течении, а р. Авлоги – в среднем течении, что может быть связано с поступлением фосфора из антропогенных источников, в числе которых ряд населенных пунктов с малоэтажной застройкой и приусадебными хозяйствами, птичник и свалка.

По содержанию общего фосфора озера Мадалаярви и Воляярви классифицированы как эвтрофные, Хепоярви – мезотрофное [Никаноров, 2005]. Межгодовая изменчивость концентраций биогенных элементов (фосфора и азота), легкоокисляемого органического вещества и диоксида углерода в нижнем течении р. Морье, судя по данным за весь период исследования 2019–2020 гг., может быть соизмеримой и даже существенно превышать их внутригодовую (сезонную) изменчивость. Постоянно несколько повышенные концентрации биогенных элементов в нижнем течении р. Вьюн при наименьшей сезонной изменчивости, очевидно, связаны с постоянным антропогенным воздействием на этот участок водной системы со стороны пос. Запорожское. Отношение N/P на разных участках исследованных водных систем подвержено сезонной изменчивости, исключением в отношении устойчивости лимитирования является лишь оз. Воляярви, где постоянно отмечался избыток соединений азота (фосфорное лимитирование первичного продуцирования).

Для всех трех рек максимум стока приходился на весеннее половодье. Наибольший объем стока весной и летом приходится на р. Морье, а осенью и зимой на р. Вьюн. Минимальные значения среднегодовой нагрузки биогенными элементами и органическими веществами на экосистему Ладожского озера отмечены для системы р. Авлоги (возможно, из-за недооценки объема стока), а максимальные – для системы р. Морье.

Наибольшие значения содержания органического вещества в донных отложениях (по ППП) закономерно отмечаются в тонкодисперсных отложениях озёр Мадалаярви и Воляярви, наименьшие в системе р. Авлоги относятся к песчаным отложениям. Наибольшее содержание ряда тяжелых металлов – цинка, хрома, меди и свинца также относится к озёрным отложениям Мадалаярви, Воляярви и Хепоярви. В системе р. Морье концентрации тяжелых металлов не превышают ПДК для почв, что, вероятно, связано с низкой сорбционной емкостью грубодисперсных донных отложений. В системе р. Авлоги отмеченные превышения могут быть связаны с геохимической аномалией регио-

на, а накопление цинка и свинца в донных отложениях оз. Хепоярви (система р. Морье) с большой вероятностью связано с антропогенным воздействием. Для всех исследованных объектов характерны пониженные относительно Кларковского содержания в осадочных породах концентрации титана, никеля, стронция и ванадия.

Исследования, выполненные на ряде водотоков западного побережья Ладожского озера, являющихся правобережными притоками р. Вуоксы, в период открытой воды 2021 г., также позволили выявить ряд закономерностей и особенностей гидрохимического режима. Все исследованные водотоки относятся к разряду малых. Их протяженность изменяется от 6 км (руч. Щучий) до 24 км (р. Лосевка), ширина – от 1,5 м (руч. Щучий) до 15 м (р. Булатная), глубина – от 0,3 м (руч. Щучий) до 1,5 м (р. Лосевка). Наибольшая водосборная площадь характерна для р. Булатной, наименьшая для руч. Щучьего. Большинство исследованных водотоков подвержены разнообразным антропогенным воздействиям, среди которых основными являются поступления хозяйственно-бытовых и сельскохозяйственных стоков с разных участков их водосборных площадей.

Установлено, что показатели сезонной динамики как качественные (тенденции сезонных изменений), так и количественные (кратность изменения), большей части основных гидрохимических характеристик существенно различны в водотоках, в формировании гидрологического и гидрохимического режимов которых первостепенную роль играет озерное питание (реки Булатная и Сосновка), и в водотоках, водное питание которых осуществляется за счет поступления с речного водосбора, атмосферных осадков и подземных вод (р. Лосевка, ручьи Тихий и Щучий). К числу таких гидрохимических характеристик относятся компоненты минерализации (главные ионы) и их соотношение, показатели органического вещества (ХПК, цветность, БПК₅), главнейшие биогенные элементы (фосфор и азот) и соотношение их форм, водородный показатель рН, взвешенные вещества, растворенный кислород. Гидрохимический режим рек Сосновки и Булатной, берущих начало из озер, в период открытой воды в целом схож с таковым для озер истока.

Наименее минерализованные воды имеет р. Булатная – самый западный из исследованных притоков Вуоксы. Значение суммы главных ионов в водах реки практически равно таковому в водах р. Бурной. Наиболее минерализованные воды обнаружены в р. Сосновке. Установлено, что на величину минерализации воды, соотношение главных ионов и сезонную динамику этих показателей, помимо природных факторов, существенное влияние оказывает антропогенное воздействие, что было выявлено на примере р. Сосновки.

Антропогенное воздействие, оказываемое на р. Сосновку в среднем ее течении, приводит к существенному росту содержания главных ионов и изменению их природного соотношения, органического вещества, особенно легкоокисляемого, биогенных элементов, снижению концентрации кислорода. В целом, содержание фосфора в водах исследованных водотоков, за исключением р. Булатной и руч. Щучьего, достаточно высокое, соответствующее гиперэвтрофному статусу. В среднем течении р. Сосновки можно говорить о фосфорном загрязнении, источником которого являются хозяйственно-бытовые сточные воды, поступающие в реку в пос. Сосново в районе ст. С-2 (рис. 6.3). Однако пространственная динамика вышеперечисленных показателей по мере движения вниз по течению р. Сосновки свидетельствует о том, что механизмы самоочищения действуют в экосистеме реки достаточно успешно. Установлено, что наибольший вклад в формирование режимов легкоокисляемого органического вещества и биогенных элементов в исследованных водотоках вносит антропогенный фактор. В целом, по результатам гидрохимических исследований в изученных правобережных притоках р. Вуоксы не выявлено признаков заметного загрязнения, за исключением среднего течения р. Сосновки.

Исследование элементного состава донных отложений водотоков показало, что содержание основных микроэлементов (титана, хрома, никеля, меди, стронция, ванадия и цинка) для всех исследованных объектов ниже Кларковского содержания в осадочных породах. Положительные геохимические аномалии отмечены для марганца на всех точках пробоотбора в р. Сосновке, а также в ручье Щучьем и р. Булатной. В среднем течении р. Сосновки повышены концентрации кобальта. Для всех проб донных отложений, за исключением верхнего течения р. Сосновки (ст. С-1) и ручья Тихого, отмечено повышенное содержание свинца, что косвенно свидетельствует о том, что значимым источником поступления тяжелых металлов в донные отложения рек водосбора р. Вуоксы может являться автотранспорт.

Результаты исследования озерно-речных систем Нижне-Вуоксинского ландшафта – оз. Нарядное – р. Сёмужья, озера Гусиное и Болотное – руч. Прозрачный, выполненные в 2022 г., показали, что данные водные системы являются низкоминерализованными (рис. 6.4) и крайне уязвимыми по отношению к внешним негативным воздействиям. Высокие концентрации ионов натрия на отдельных участках водных экосистем в основном являются природной особенностью, связанной с поступлением напорных гидрокарбонатно-натриевых вод, возрастание роли хлоридов – следствием природного закисления, ведущего к снижению (вплоть до полного отсутствия) количества гидрокарбонатов.

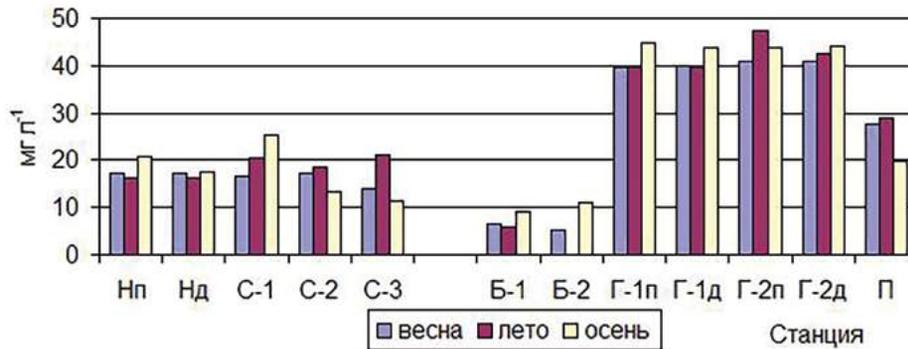


Рис. 6.4. Суммы главных ионов ($\Sigma_{и}$) в воде озерно-речных систем оз. Нарядное – р. Сёмужья, озера Гусиное и Болотное – руч. Прозрачный в период открытой воды 2022 г.

Обозначения: станции отбора проб: Нп – оз. Нарядное, поверхностный слой; Нд – оз. Нарядное, придонный слой; С-1 – р. Сёмужья, верхнее течение; С-2 – р. Сёмужья, среднее течение; С-3 – р. Сёмужья, нижнее течение; Б-1 – оз. Болотное; Б-2 – протока из оз. Болотного; Г-1п – оз. Гусиное, северная оконечность озера, поверхностный слой; Г-1д – оз. Гусиное, северная оконечность озера, придонный слой; Г-2п – оз. Гусиное, южная оконечность озера, поверхностный слой; Г-2д – оз. Гусиное, южная оконечность озера, придонный слой; П – руч. Прозрачный

Из-за значительной заболоченности данного ландшафта в водные экосистемы поступает большое количество органических веществ, в основном гумусовых соединений, в результате чего цветность воды небольших водотоков и мелководных озер достигает достаточно высоких значений, а водородный показатель падает до уровня кислых вод (природное закисление). Установлено, что на химический состав вод водотоков определяющее влияние оказывает поступление веществ с частных речных водосборов, поэтому гидрохимические показатели стоков озер (р. Сёмужья и ручья Прозрачного) в основном существенно отличаются от таковых в озерных водах (соответственно, в оз. Нарядном и оз. Гусином).

В период открытой воды р. Сёмужья и руч. Прозрачный приносят в Ладожское озеро воды, содержащие соединения фосфора в достаточно высоких концентрациях, однако, благодаря низкому расходу воды вклад этих водотоков в фосфорный запас в озере невелик. Концентрации общего азота в водах этих рек равны его средней концентрации в Ладожском озере. По усредненным за период открытой воды концентрациям общего фосфора оз. Нарядное классифицировано как мезоэвтрофный водоем, озера Гусиное и Болотное – эвтрофные [Никаноров, 2005]. Очевидно, эвтрофирование оз. Гусино обусловлено действием антропогенного фактора. Повышенные концентрации нефтяных углеводородов в воде оз. Гусино, со всех сторон окруженного автомобильными дорогами, являются следствием их поступления от автомобильного транспорта. Иных признаков загрязнения в исследованных водных экосистемах не выявлено.

Концентрации свинца в донных отложениях озёр Гусино и Нарядного, в 2–3 раза превышающие установленные нормативы [ГН 2.1.7.2041-06, 2018; ГН 2.1.7.2511-09, 2009], являются следствием близости автодорог. Медь, цинк и марганец, обнаруженные в повышенных концентрациях на отдельных участках озерно-речных экосистем, имеют природное происхождение. На участках водотоков, имеющих большую скорость течения, накопление металлов и органического вещества в донных отложениях закономерно происходит в меньшей степени, чем в стоячих водах.

Развитие различных гидробионтов в озерно-речных системах определяется рядом факторов, среди которых большое значение имеет площадь и освоенность водосбора, характеристика источника, условия питания водотока, морфология русла, скорость течения, химизм воды, а также наличие антропогенной нагрузки. Планктонная альгофлора исследованных озерно-речных систем довольно

разнообразна, ее состав определяли водоросли 9 основных отделов, что характерно для водоемов и водотоков умеренной зоны [Трифонов, Павлова, Афанасьева, 2006]. Максимальное разнообразие и наибольший уровень развития фитопланктона, как правило, наблюдался в верхнем течении рек, особенно это выражено в реках, берущих начало из озер. Потери таксономического состава водорослей вниз по течению рек составляли от 40 % до 50 %. В планктоне нижнего течения большинства исследованных рек появлялись «новые виды», в основном реофильные, бентосные виды и обрастатели, что свидетельствует о значительной трансформации фитопланктонных сообществ в них.

Уровень биомассы фитопланктона и ее структура во всех исследованных озерно-речных системах значительно отличались по сезонам и вдоль по течению рек. В целом, количественное развитие фитопланктона в озерно-речных системах было незначительным, что связано с повышенной гумификацией вод (реки Морье, Семужья), низкими значениями рН воды (оз. Болотное, протока из оз. Болотного), высокими скоростями течения (реки Вьюн, Лосевка, Сосновка), малой глубиной (руч. Тихий, Щучий, Прозрачный). Наиболее высокие величины биомассы фитопланктона были отмечены в реке Авлоге, что связано с более высокими концентрациями биогенных элементов в ней за счет значительной освоенности ее водосборной территории. В среднем за сезон по состоянию фитопланктонных сообществ воды озерно-речных систем относятся к разряду чистых и слабо загрязненных вод (II и III класс чистоты вод), что свидетельствует об отсутствии сильных органических загрязнений.

На структурно-функциональные характеристики перифитона в исследованных озерно-речных системах влияют, прежде всего, отсутствие высшей водной растительности как субстрата, затенение, морфология русла, малая глубина и высокие скорости течения [Комулайнен, 2004]. В связи с этим в реках развивались относительно бедные по количеству видов, но стабильные сообщества обрастаний, трансформация которых происходила при переходе озерных условий в речные. Достаточно сильно сказывается влияние гумификации вод на состав и количественное развитие перифитона. Так, в нижнем течении р. Морье развивались виды «болотного комплекса», преимущественно диатомеи из родов *Eunotia*, *Tabellaria Pinnularia*. Структура и уровень биомассы перифитона определялась пространственной и сезонной динамикой небольшого количества, в основном, диатомовых и зеленых водорослей. Так же, как и в фитопланктоне, в перифитоне большинства рек происходило обеднение видового состава и снижение интенсивности развития вниз по течению водотоков.

Высшая водная растительность озер, входящих в изученные водные системы, развита достаточно хорошо. Среди макрофитов эвтрофных озер обычны виды, толерантные к повышенному содержанию биогенных элементов: кубышка желтая, элодея канадская, ежеголовник всплывающий, стрелолист обыкновенный и касатик, но погруженная растительность из-за высокой цветности воды отсутствовала. В мезотрофных озерах встречалась лобелия Дортмана – показатель чистоты вод. Высшая водная растительность водотоков, напротив, развита очень слабо, что связано с морфологией русла, крутыми берегами и высокими скоростями течения. Кроме того, большинство рек и ручьев на большем протяжении лишены зарослей высшей водной растительности из-за затенения лесным пологом. Соответственно, в них вклад макрофитов в создание первичной продукции минимален.

Санитарное состояние всех исследованных озерно-речных экосистем на протяжении вегетационного сезона можно было считать благополучным. По гигиенической классификации водные массы исследованных водоемов имели индекс загрязнения 0, что подразумевает их пригодность для всех видов использования. Исходя из численности сапрофитных бактерий (ОМЧ), ни одна из исследованных водных систем не была подвержена антропогенному воздействию, вызывающему органическое загрязнение, в том числе, фекальное, их водные массы на протяжении всего вегетационного сезона относились к категории «чистые». Нередко в кислых, гумифицированных водоемах концентрация сапрофитных микроорганизмов бывает ниже, чем в негумифицированных, так как гуминовое органическое вещество является труднодоступным субстратом для бактерий, однако в исследованных водоемах и водотоках подобной тенденции не наблюдалось.

Функционирование зоопланктона во всех изученных водных системах различалось в озерной и речных частях. Так, в водотоках развитие зоопланктона определялось их малой глубиной, высокой скоростью течения, мутностью воды, а также наличием антропогенной нагрузки. Эти факторы, в целом, определяли, как бедный видовой состав зоопланктона во всех реках и ручьях, так и невысокие величины численности и биомассы этого сообщества. Озера, из которых вытекают реки, соответс-

твовали уровню эвтрофных водоемов, что отражалось на структурно-функциональных характеристиках зоопланктона [Андроникова, 1996]. Для зоопланктона этих озер характерно относительно высокое таксономическое разнообразие, более высокое количественное развитие и определенная сезонная динамика.

Как видовой состав, так и продуктивность зоопланктонных сообществ, во всех изученных озерно-речных системах свидетельствует об отсутствии сильных загрязнений [Родионова, 1988]. Во всех водных системах наблюдалась последовательная трансформация всех структурно-функциональных характеристик зоопланктона от озерных станций к речным, что выражалось в снижении видового разнообразия и численных показателей развития, а также смене доминирующих видов.

Протозойный планктон исследованных озерно-речных систем характеризовался бедным видовым составом, особенностью которого можно считать практически полное отсутствие крупных простейших и доминирование их среднеразмерной фракции. Во всех водных системах наблюдалось постепенное понижение количественных показателей простейших от весны к осени. Анализ трансформации сообществ простейших в системе «водоем – водоток» показал, что, как правило, озерный протозойный планктон имеет более высокие количественные показатели, чем в водотоках, причем они имеют тенденцию к увеличению от истока к устью. Сезонная динамика простейших не отличается от сезонной динамики в большинстве водоемов умеренной зоны. Величины численности и биомассы протозойного планктона в исследованных озерно-речных системах характерны для мезотрофных и слабomezотрофных водоемов и водотоков, что косвенно может свидетельствовать об отсутствии сильных органических загрязнений.

Так же, как и в других сообществах гидробионтов, разнообразие зообентоса отличалось в лотических и лентических условиях. Установлено, что в реках и ручьях разных водных систем может встречаться от 20 до 50 % «озерных» видов. Для основного русла рек, вытекающих из озер, были характерны максимальные величины численности и биомассы животных, ниже по течению количественное развитие и разнообразие зообентоса, как правило, падало, но в некоторых реках наблюдалась обратная картина. Кроме того, для зообентоса рек характерна значительная сезонная динамика видового состава и структуры. Важным фактором является изменение гидрологических характеристик, таких как скорость течения, которые существенно меняли характеристики донных биотопов. Кроме того, ускорение течения способствует дрейфовому переносу донных беспозвоночных и их перераспределению вдоль русла рек. В гумифицированных водоемах снижались общие количественные показатели бентосных сообществ и их участие в деструкции органического вещества. Оценивая экологическое состояние исследованных водных систем по показателям зообентоса, показано, что они находятся в состоянии умеренного загрязнения.

За год биологические сообщества минерализуют в р. Авлоге порядка 10 т С органического вещества, это почти 17 % от величины нагрузки реки на Ладожское озеро, в том числе, вклад в этот процесс сообщества зообентоса составляет 4 % (2,4 т С). В р. Морье ориентировочный уровень минерализации органических веществ биотой составляет 17 т С (3,6 % от нагрузки), а доля зообентоса крайне мала – 0,4 % (2 т С). В р. Вьюн объем минерализованного биологическими сообществами органического вещества самый большой – 33 т С, из них зообентосом – почти 13 т С, но эти величины составляют только 5 и 2 % от уровня нагрузки органическим углеродом этой реки на Ладожское озеро. Следовательно, критические изменения условий обитания в реках, связанные с антропогенными воздействиями, могут увеличить нагрузку органическим веществом, создаваемую этими реками, на 4–17 % от существующих величин, за счет снижения деструкции, или даже больше, если учесть удержание части вещества в живой биомассе. Если же допустить вероятное увеличение самой нагрузки с водосборов этих водных систем при их активном хозяйственном освоении, то ситуация может стать критической.

В целом, можно отметить, что, несмотря на существенную антропогенную нагрузку на отдельные участки водосборов изученных озерно-речных систем, итоговая нагрузка в устьях рек существенно снижается за счет механизмов самоочищения, таким образом, в настоящее время их суммарная нагрузка на Ладожское озеро невысока. Результаты работы, направленной на более глубокое понимание путей и особенностей антропогенных трансформаций водных систем различных геохимических ландшафтов, могут служить основой для прогнозирования состояния экосистем, уточненной оценки допустимой антропогенной нагрузки и разработки стратегии их сохранения и восстановления.

6.2. Изучение современного состояния озер Карельского перешейка

Лимнологическая станция на оз. Красном, расположенная в центре Карельского перешейка, была основана в 1948 г. как экспериментально-методическая база Лаборатории озераедения АН СССР для изучения озерных процессов в условиях стационара и региональных исследований водоемов этого озерного края. Первый ученый секретарь Лаборатории озераедения, и впоследствии заведующий сектором географии Института Николай Иванович Семенович, выбирая для стационарных исследований Карельский перешеек, считал, что этот регион является природной лимнологической лабораторией, где можно найти весь диапазон различных показателей, относящихся к озерным экосистемам. На территории Карельского перешейка насчитывается около 700 озёр, которые относятся к двум бассейнам – Ладожского озера и Финского залива [Филенко, 1960]. Положение района на стыке двух крупных геоморфологических областей: Балтийского кристаллического щита и Русской равнины определяет резкую неоднородность его геологического строения и большое разнообразие ландшафтов. По характеру рельефа и особенностям распределения поверхностных четвертичных отложений выделяются кристаллический массив (сельговый ландшафт), террасированные равнины с озерно-ледниковыми наносами и центральное плато [Исаченко, Карнаухова, Дашкевич, 1965]. В северной части отмечается выход на поверхность древних горных пород и резко выраженный грядово-ложбинный рельеф. Многочисленные ложбины, занятые озерами, вытянуты в северо-западном направлении и чередуются с участками холмистого рельефа, характерен сельговый рельеф. Террасированная равнина включает обширную территорию северной низины, которая представляет собой широтное понижение между Ладожским озером и Финским заливом, где в позднеледниковое время находился пролив, соединяющий эти два бассейна. Основание равнины слагают моренные отложения. Холмы и гряды вытянуты с северо-запада на юго-восток и разделены ледниковыми долинами, как правило, занятыми озёрами. Центральное плато резко поднимается над окружающей низиной. Основание плато слагают кембрийские глины, покрытые мощной толщей четвертичных отложений. Рельеф плато сравнительно ровный, полого-холмистый, иногда встречаются моренные возвышенности, озовые гряды и плоские водоразделы и депрессии [Рожнова, 1963].

Неоднородность геологического строения Карельского перешейка отражается и на характере водного питания. Район кристаллического массива покрыт густой гидрографической сетью, озерность составляет 15–20 %. Южная часть, расположенная в пределах Русской равнины, отличается менее развитой водной сетью, озерность всего 4,2 % [Филенко, 1960]. Водосборы озер охватывают территории, сложенные отложениями, хорошо промытыми ледниковыми водами и затем выщелоченными атмосферными осадками. Почвы Карельского перешейка в основном супесчаные, слабо- и среднеподзолистые и подзолисто-болотные, что обуславливает низкую минерализацию озерных вод. Слабоминерализованные воды рек и озер Карельского перешейка по соотношению главных ионов относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Общая минерализация воды колеблется от 21 до 100 мг/л, причем наиболее низкие величины характерны для озер северной части перешейка, сельгового района и Приладожья. В ионно-солевом составе преобладают анионы HCO_3^- и катионы Ca^+ [Озера различных ландшафтов..., 1968; Особенности формирования качества..., 1984]. Существенную роль в формировании химического состава озерных вод играют маломинерализованные болотные воды. Обилием болот обусловлена высокая степень гумификации вод [Рожнова, 1963]. Гуминовые соединения окрашивают озерную воду в буровато-жёлтый цвет. Характерной особенностью озер Карельского перешейка является высокое содержание железа, его окисных и закисных соединений, а также железа, связанного в органические комплексы. Для ряда озер отмечено накопление железа в осадках и связанное с этим рудообразование [Семенович, 1958].

В 1946 г. Лаборатория озераедения включилась в работы комплексной экспедиции АН СССР по проблеме миграций железа и марганца в связи с образованием железных и марганцевых руд. В задачу отряда под руководством Н.И. Семеновича, помимо специальных исследований, входило общее ознакомление с озерами Карельского перешейка и выбор водоема для организации лимнологической станции. Экспедицией было обследовано 16 озер, в том числе крупнейшие озера центральной части перешейка. Итогом работ явилась монография о лимнологических условиях накопления железистых осадков в озерах [Семенович, 1958]. Для основания станции было выбрано оз. Пуннусярви, расположенное на стыке двух геоморфологических районов – центрального плато и запад-

ной изменности. После создания стационара лимнологическими исследованиями были охвачены и другие водоемы. В первые годы работы Лимнологической станции был получен большой натуральный материал по озерам [Озера Карельского перешейка..., 1964].

Следующий период исследования озер Карельского перешейка в 1960-е гг. был связан с работами Лаборатории озераведения АН СССР по изучению особенностей лимнических процессов озер в зависимости от окружающего ландшафта. Для качественной и количественной оценки озерных ресурсов требовалась разработка принципов типизации озер на основе ландшафтного подхода. С 1962 по 1974 гг. комплексная ландшафтно-лимнологическая экспедиция Института провела исследования на озерах, расположенных в различных географических зонах, в том числе в средней тайге Карельского перешейка. Экспедиция работала на севере перешейка, на водоемах сельгового ландшафта [Озера различных ландшафтов..., 1968]. В результате была выявлена крайне низкая минерализация и низкая биологическая продуктивность озер сельгового ландшафта.

На Лимнологической станции с 1963 г. были начаты режимные наблюдения на основном водоеме – оз. Красном. Это было связано с приходом на должность заведующего Лабораторией гидробиологии Института озераведения д.б.н. Ивана Ивановича Николаева, много лет проработавшего на Балтике, где он занимался изучением влияния гидрологических и климатических факторов на продуктивность биологических сообществ. Иван Иванович был сторонником гипотезы «детерминированности всей системы годового цикла водоемов годовым ходом поступающей в водоем энергии, первоисточником которой является солнечная радиация». Ему принадлежит идея исследования лимнологических циклов всех компонентов водной экосистемы озера, сопряженных между собой и связанных с природными ритмами тепла и увлажненности. Круглогодичные наблюдения на оз. Красном показали, что циклы многих компонентов имеют более сложную структуру, чем календарные сезоны года. Подобные исследования могли быть выполнены только при стационарных наблюдениях.

Обобщающая статья И.И. Николаева содержит очерк структуры и формирования годового лимнологического цикла водоемов умеренной зоны, по существу, одну из первых эмпирических моделей структуры годового лимнологического цикла озера. Материалы этих исследований были доложены на XVII Международном Лимнологическом конгрессе в 1971 г.

В конце 1960-х и в 1970-е гг. на станции сложился сильный научный коллектив – метеорологи: К.А. Мокиевский, В.Н. Степанова; гидрологи: Ф.Ф. Воронцов, Н.К. Воронцова, И.П. Граевский, Д.Д. Квасов, Л.Г. Кузьменко; гидрохимики: Е.А. Стравинская, Л.И. Суворова, Т.М. Поливанова, Д.С. Ульянова; гидробиологи: И.Н. Андроникова, Н.В. Родионова, В.Г. Драбкова, Е.Н. Чеботарев, Л.А. Жаков, В.М. Катанская, И.С. Трифонова, Е.В. Станиславская, К.Н. Кузьменко. Важным этапом явилось участие сотрудников в работе по Международной Биологической Программе (МБП), основной задачей которой было изучение биологической продуктивности водоемов. Исследования по МБП проводились в СССР на 13-ти водоемах, расположенных в разных географических регионах страны. Озеро Красное значилось как Тема №1, где был собран наиболее полный материал, включающий ежедекадные отборы проб в вегетационный период и ежемесячные – в период ледостава. Подробные исследования сообществ гидробионтов с использованием методов расчета их продукции и учетом гидрологических и гидрохимических факторов завершились составлением годового биотического баланса озера Красного. Результаты работы по МБП докладывались на двух промежуточных конференциях – в 1972 г. (Варшава), и в 1973 г. (Минск) и опубликованы в коллективной монографии «Биологическая продуктивность озера Красного» [1976].

Развитие продукционных исследований в конце 1970-х гг. в дальнейшем явилось основой актуальных исследований по эвтрофированию водных экосистем под влиянием антропогенных факторов. К этому времени в пределах водосбора оз. Красного была построена огромная птицефабрика, стоки которой стали сбрасываться в озеро по одному из притоков. Многолетний ряд наблюдений (1964–1975 гг.) позволил выявить начальный этап процесса антропогенного эвтрофирования. Было установлено, что по содержанию хлорофилла и величине первичной продукции трофический тип озера Красного колеблется между мезотрофным и слабо-эвтрофным. Совместные работы гидробиологов и гидрологов впервые на основе натуральных наблюдений позволили рассчитать фосфорную нагрузку на озеро по Фолленвейдеру, которая в 1,5 раза превысила критическую. Наблюдалось повышение концентрации общего фосфора, органического вещества и биомассы фитопланктона [Эвтрофирование мезотрофного озера, 1980]. Наиболее заметной реакцией на антропогенное эвтро-

фирование, наряду с повышением продуктивности фитопланктона, было массовое развитие цианопрокариот, «цветение» воды. Некоторые изменения были отмечены локально в районе притока, приносящего сточные воды, чувствительными оказались виды-индикаторы растительного перифитона и бентоса, обитатели литоральной зоны.

В конце 1970-х гг. под руководством д.б.н. Инны Николаевны Андроникиной были проведены комплексные сезонные исследования по определению качества воды разнотипных озер Карельского перешейка, не подверженных интенсивному антропогенному воздействию. Качество воды понималось как способность экосистемы, сформировавшейся в процессе длительной эволюции, сохранять стабильность и сбалансированность внутриводоемных процессов, определяющих в настоящее время её статус. С помощью биоиндикационного анализа определяли степень сапробности водоема, которая, как правило, соотносится с показателями его трофического типа. Подробные исследования в течение двух вегетационных периодов 1977–1978 гг. не выявили диапазоны этих показателей для разнотипных озер, был проведен анализ связи между экологическим состоянием водоемов и особенностями их водосборных бассейнов [Особенности формирования качества..., 1984]. Для исследованных озер Карельского перешейка была установлена прямая связь трофического статуса с уровнем поступления общего фосфора [Стравинская, Трифонова, Ульянова, 1985]; проанализированы изменения состава, структуры и продукционных показателей фитопланктона в разнотипных озерах в зависимости от трофического состояния [Трифопова, 1979].

Комплексные наблюдения на озере Красном по сокращенной программе (с мая по октябрь) под руководством Ирины Сергеевны Трифоновой продолжались до 1986 г. Обобщение многолетних материалов за 25 лет наблюдений позволило осмыслить некоторые теоретические и методические проблемы экологического мониторинга озер в книге «Методические аспекты лимнологического мониторинга» [1988]. Была окончательно установлена четкая детерминированность продукционных процессов в озере гидрометеорологическими факторами, в первую очередь, термическим. По многолетним наблюдениям максимальная продуктивность биологических сообществ отмечалась в наиболее теплые годы маловодных периодов. Анализ соотношения влияния природных и антропогенных факторов на процесс эвтрофирования озера показал, что на начальном этапе эвтрофирования антропогенные процессы во многом нивелируются климатическими факторами, а трофическое состояние мезотрофного озера зависит от погодных условий. В годы с преобладанием антициклонального типа погоды по уровню продуктивности озеро приближается к эвтрофному типу, а в условиях циклонального типа погоды остается мезотрофным. Наиболее показательны на фоне медленного повышения продуктивности биологических сообществ существенные изменения в их структуре, в первую очередь, исчезновение реликтовых организмов.

В 1980-х гг. на Лимнологической станции активно велись работы по диагностике и прогнозу экологического состояния водоемов на основе методов математического моделирования и дистанционных методов зондирования Земли. Под руководством начальника станции д.ф.-м.н. Константина Дмитриевича Креймана был разработан и построен экспериментальный комплекс, получивший название «Аэрогидроканал», который позволял исследовать процессы взаимодействия атмосферы и водной подстилающей поверхности, формирования верхнего перемешанного слоя, а также процессы турбулентного вовлечения в стратифицированной водной среде (см. главу 12). Базы данных многолетних наблюдений на озере Красном и его основном притоке реке Странице с площадью водосбора около 80 км² использовались специалистами ИНОЗ РАН для верификации разрабатываемых моделей. На рис. 6.5 представлены результаты верификации модели формирования стока и выноса общего фосфора с водосбора, а также уровня озера за период наблюдений в устье р. Страницы (1979–1984). После верификации модель использовалась для выполнения серии имитационных расчетов по оценке возможного изменения биогенной нагрузки на озеро в результате интенсификации сельскохозяйственной деятельности на водосборе [Кондратьев, 2007].

Модель термического режима водной массы озера и его донных отложений разработана в ИНОЗ РАН в предположении горизонтальной температурной однородности водоема, которое с хорошей точностью выполняется в мелководных стратифицированных озерах [Golosov, Zverev, Terzhevik, 2003]. Модель рассчитывает вертикальное распределение температуры в водной массе озера и донных отложениях в течение годового цикла термического режима озера (см. главу 12). Примеры расчетов по модели, выполненных для оз. Красного при метеоусловиях 1974 г., приведены на рис. 6.6.

В ходе верификации модели показано, что она адекватно описывает внутригодовой ход температуры в системе вода-дно и воспроизводит динамику ледового покрова в озере, а также требует минимум входной информации для ее использования. В последующих исследованиях разработанные модели использовались при оценке воздействия изменений климатических параметров на гидрофизические характеристики системы водосбор-водоем [Kondratyev, Golosov, 1998; 2004].

Модель термического режима озера в середине 1990-х гг. была дополнена экологическим модулем, позволявшим воспроизводить сезонную динамику биомассы фитопланктона и концентрации фосфатов в воде озера [Golosov, Ignatieva, 1999]. С использованием модифицированной модели впервые было дано объяснение феномену увеличения концентрации фосфатов в воде озера Красного в период осеннего конвективного перемешивания на фоне окислительных условий в водной массе и верхнем слое донных отложений (рис. 6.7).

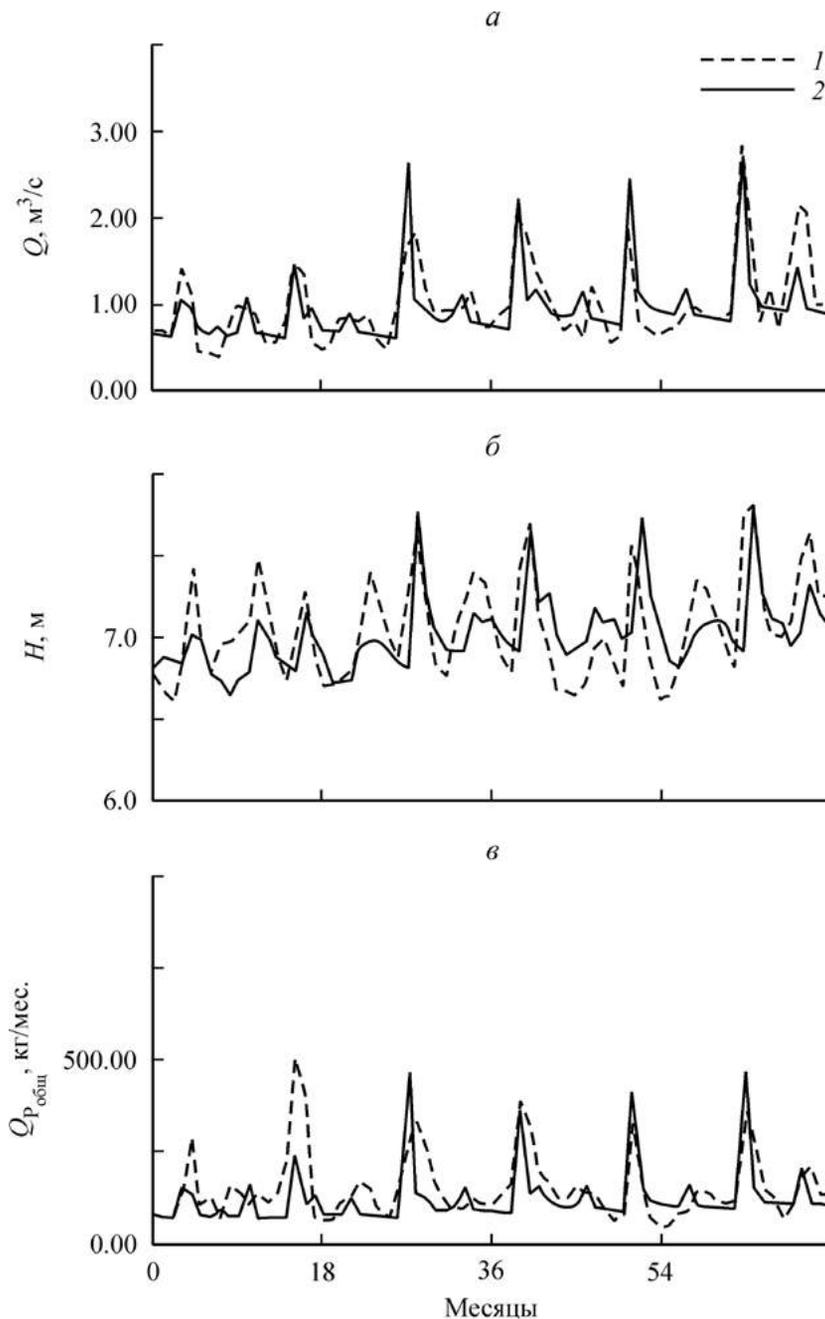


Рис. 6.5. Измеренные (1) и рассчитанные (2) расходы воды Q в замыкающем створе р. Страницы (а), уровни оз. Красного H (б) и расходы общего фосфора $Q_{\text{пол}}$ (в) со стоком р. Страницы за период 1979–1984 [Кондратьев, 2007]

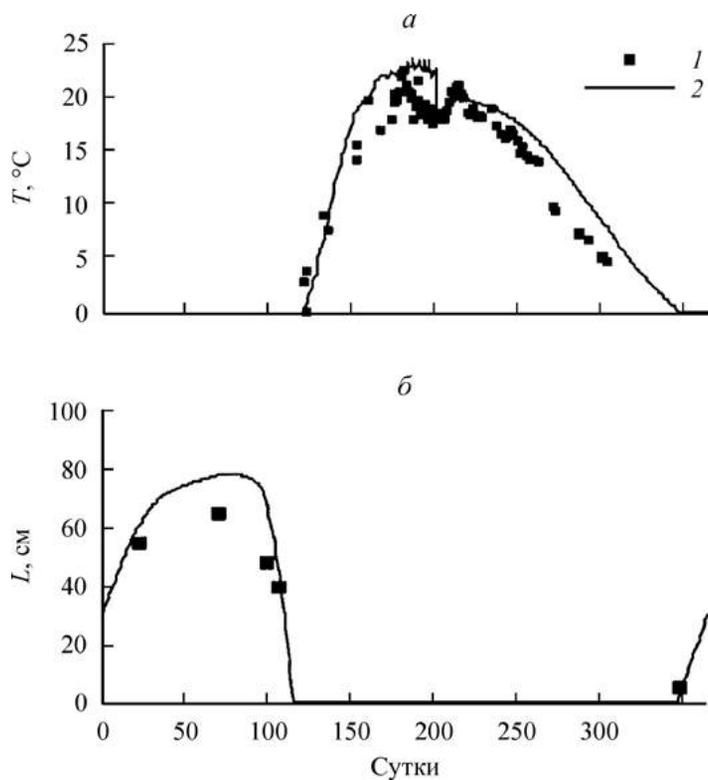


Рис. 6.6. Измеренные (1) и рассчитанные (2) значения температуры перемешанного слоя водной массы оз. Красного Т (а), а также толщины льда L (б) в 1974 г. [Кондрагьев, 2007]

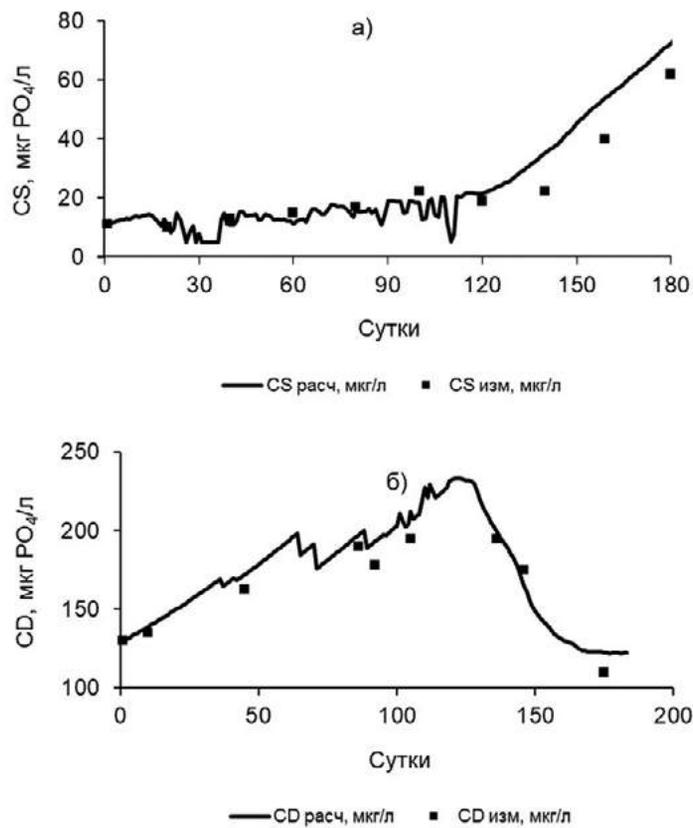


Рис. 6.7. Измеренные и рассчитанные по модифицированной модели значения концентрации фосфатов в воде (а) и в верхнем слое донных отложений (б) оз. Красного в 1970 г.

Регулярные натурные исследования на оз. Красном возобновились в 1991 г., их продолжали А.Л. Афанасьева, Н.К. Воронцова, В.П. Беляков, И.А. Денисова, К.Н. Кузьменко, Е.С. Макарецва, В.В. Скворцов, Е.В. Станиславская, Л.И. Суворова, И.С. Трифонова, Д.С. Ульянова, Е.Н. Чеботарев. В этот период особое внимание было уделено влиянию циклических климатических изменений на экосистему озера. При финансовой поддержке грантов РФФИ (01-04-4992 и 03-94-06-932) проводили исследования влияния природных и антропогенных факторов на состояние планктонных сообществ озера Красного [Многолетние изменения химико-биологических..., 2002]. По многолетним наблюдениям выявлена близкая к 11-летней цикличность планктона и противофазы в развитии фито- и зоопланктона [Трифонова, Макарецва, 2006]. Опыт мониторинга на оз. Красном показал, что на начальных этапах эвтрофирования при оценке состояния водоема важно учитывать фазу водности в момент исследований. В маловодные периоды негативные процессы эвтрофирования значительно усиливаются.

В 1987–1989 гг. сотрудниками под руководством Валентины Гавриловны Драбковой проводились комплексные лимнологические исследования системы зарастающих озер Глубокое, Охотничье и Большое Раковое. Зарастание озер происходило из-за резкого падения уровня в результате разрушения сложной системы плотин. В тоже время озера имеют большое значение как орнитологический заказник. Результатом этих работ явилась монография «Экология зарастающего озера и проблема его восстановления» [1999]. Параллельно под руководством И.С. Трифоновой коллектив занимался изучением озерно-речной системы Вуоксы в рамках хоздоговорной темы с ЛЕНГИДРОПРОЕКТОМ. Задачей исследования являлась оценка влияния ГЭС на состояние биологических сообществ озерно-речной системы. Было показано, что при прохождении через плотины двух ГЭС в верхнем течении реки часть планктонных организмов разрушается, особенно страдает зоопланктон, но наличие озерных расширений и больших озер в среднем и нижнем течении позволяет планктону восстанавливать и даже увеличивать численность популяций [Экологическое состояние озерно-речной..., 2005]. Полученные материалы были обобщены в книге «Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы» [2004].

Оз. Красное остается одним из уникальных объектов многолетних наблюдений на Северо-Западе России. Как показали исследования 1990-х гг., статус оз. Красного оставался мезотрофным, что связано с очевидным ослаблением антропогенного воздействия в начале 90-х гг. прошлого столетия. Однако, с конца 1990-х гг. в связи с началом массового строительства по берегам озера и усилением рекреационной активности начался новый этап эвтрофирования. По данным 40-летних исследований (1964–2005) опубликована монография, где прослежены многолетние изменения гидрологического и гидрохимического режимов а также состава и продуктивности биологических сообществ (фито-, зоо-, бактериопланктона, макрофитов, зообентоса) в оз. Красном, оценено влияние процесса эвтрофирования и гидрологических факторов, обусловленных климатическими флуктуациями, на межгодовую динамику биологических сообществ, динамику численности популяций массовых видов и трофические связи между сообществами [Многолетние изменения биологических..., 2008]. В конце 1990-х гг. отмечался маловодный период, пик которого приходился на 1999 г. В 1999 г. наблюдался экстремальный весенний пик фитопланктона за счет вспышки популяции доминирующего вида диатомовых водорослей *Aulacoseira islandica* (свыше 10 млн кд./л). В последующие годы этот вид исчез из планктона, а в летние периоды 2000 и 2001 гг. характеризовался массовым развитием цианопрокариот. Маловодный период был значительно короче, чем в 1970-е гг. прошлого столетия и уже 2005–2006 гг. наблюдался значительный подъем уровня, максимальные величины которого были в 2009–2011 гг. По результатам наблюдений последних лет отмечено ухудшение состояния экосистемы озера и качества воды в нем, связанное с цианобактериальным «цветением» воды, доминированием эвтрофного комплекса в фито- и зоопланктоне, агрессивным распространением чужеродного вида рдеста. Зафиксированные в 2016 и 2018 гг. максимальные летние уровни развития фитопланктона, в том числе цианобактерий, подтвердили стимулирующую роль температуры в развитии процесса эвтрофирования (рис. 6.8) [Трифонова, Афанасьева, Родионова, 2018]. Массовое развитие индикатора эвтрофных условий и, прежде всего, органического загрязнения, *Planktothrix agardhii* свидетельствуют об ухудшении состояния экосистемы оз. Красного и качества воды в нем.



Рис. 6.8. Цветение воды оз. Красного летом 2016 г. (фото М.О. Дудакова)

Новое усиление антропогенного пресса на озера Карельского перешейка с конца 1990-х гг. сказывается на состоянии их экосистем и, прежде всего, состоянии биологических сообществ. Негативную роль, несомненно, играет массовая вырубка лесов, достигшая огромных масштабов. При этом разрушаются природные ландшафты, нарушается гидрологический режим озер, усиливается их эвтрофирование и загрязнение. Несмотря на некоторое улучшение экологической ситуации в начале 1990-х гг. в связи со спадом хозяйственной деятельности на водосборах [Многолетние изменения биологических..., 2008], уровень антропогенной нагрузки продолжает оставаться высоким, а в последние годы снова наметился его рост в связи с новым подъемом промышленности и сельского хозяйства и особенно ростом индивидуального строительства на берегах и рекреационной активности.

Естественная природа Карельского перешейка, находящегося вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга, значительно изменена хозяйственной деятельностью человека. Большая часть побережья Финского залива используется как курортная зона. Расположенные в северной части перешейка города Выборг, Приморск и Приозерск являются крупными промышленными центрами. Вся территория служит местом отдыха петербуржцев. Здесь находится огромное количество садоводств, дачных поселков, оздоровительных комплексов, туристических баз. В послевоенные годы Карельский перешеек по соотношению площади леса и сельскохозяйственных угодий был сравнительно слабо освоенным лесным районом. Леса занимали около 80 % его территории, пашни – менее 15 % [Рожнова, 1963]. В 1970–1980-е гг. площадь лесов сократилась до 63 %, а площадь окультуренных земель увеличилась до 34 % [Особенности формирования качества..., 1984; Методические аспекты лимнологического..., 1988]. Большая часть сельскохозяйственных угодий, в том числе и пахотных площадей, приходится на приозерные впадины, оказывая непосредственное влияние на озера. Это влияние резко усилилось в 1970-е гг. прошлого столетия в результате интенсификации сельского хозяйства, когда резко возросло внесение минеральных удобрений, была проведена мелиорация земель, берега многих озер распаханы. Во многих из них отмечалось интенсивное антропогенное эвтрофирование, показателем которого было увеличение биомассы фитопланктона и постоянное «цветение» воды в летний период за счет массового развития сине-зеленых водорослей, скопления нитчатых водорослей у берегов [Особенности формирования качества..., 1984; Методические аспекты лимнологического..., 1988]. Отмечалось ухудшение кислородного режима. Качество воды многих озер резко снизилось. К середине 1990-х гг. в связи с резким спадом сельского хозяйства наметилось улучшение кислородного режима озер, и некоторое снижение их трофического статуса. Снижение антропогенного воздействия отмечалось до середины 1990-х гг., когда началась массовая индивидуальная застройка берегов озер и сооружение новых частных баз отдыха и пансионатов. Некоторые малые озера были практически приватизированы

и используются для рыборазведения. В результате массовой вырубki лесов разрушаются природные ландшафты, нарушается гидрологический режим озер, усиливается их эвтрофирование и загрязнение. [Многолетние изменения биологических..., 2008; Трифонова, Афанасьева, Русанов, 2016; Трифонова, Афанасьева, 2017]. В связи с этим все большее значение приобретает оценка современного состояния экосистем озер в условиях интенсивной антропогенной трансформации.

Комплексные исследования современного состояния озерных экосистем, сравнение трофического статуса озер и особенностей процесса их эвтрофирования в разных ландшафтных условиях выполнялось в 2010–2015 гг., прежде всего, в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (2012–2014). За период 2010–2015 гг. в летний период обследовано более 60 озер, включая озера, которые исследовались в 1960–1970-е гг. В работах участвовали В.П. Беляков, Д.С. Бардинский, А.Л. Афанасьева, Е.С. Макарецва, А.Г. Русанов, Е.В. Станиславская, Л.И. Суворова, И.С. Трифонова, Е.Н. Чеботарев, В.А. Щербак. Исследованные озера приурочены к различным геоморфологическим районам и различаются по морфометрии, гидрологическим и гидрохимическим характеристикам. В работе использовали ландшафтное районирование территории Карельского перешейка, предложенное А.С. Исаченко с соавторами [Исаченко, Дашкевич, Карнаухова, 1965] с небольшими изменениями (рис. 6.9). Помимо Выборгского (сельгового) ландшафта и Центральной возвышенности в качестве отдельных ландшафтов выделены Северо-Западное Приладожье, Привуоксинская низина и Приморский район, представленные террасированными равнинами. Большинство исследованных озер расположены в центральной части Карельского перешейка. Это водоемы Привуоксинской низины, залегающие в долинно-русловых впадинах и принадлежащие к озерно-речной системе, имеющей сток в Вуоксу (Красное, Правдинское, Вишневское, Волочаевское). Достаточно подробно исследованы озера Приладожья (Большое Бережное, Воробьево, Снетковское, Щукинское, Нарядное), Центрального плато, прежде всего, озера Морозовской системы (Мичуринское, Медведевское, Охотничье, Журавлевское, Большое Морозовское, Светлое, Жемчужина, Берестовое, Узорное, Борисовское, Малое Луговое, Большое Луговое, Волыньское, Петровское, Большое Щучье, Раздолинское, Уловное, Большое Борково) и озера Приморского района, относящиеся к бассейну Финского залива, включая Рошинскую группу (Чернявское, Затишье, Малое Лозовое, Победное, Большое Лебяжье, Балаково, Большое Симагинское, Дружинное, Малая Ладога, Щучье, Гладышевское, Красногвардейское, Подгорное). Значительно меньше озер обследовано в северном сельговом районе, что определяется их трудной доступностью (Белокаменное, Лесково, Большое Заветное, Лопата). Два озера Малое Лозовое и Затишье расположены на границе Центрального плато и Приморского района, в заболоченном ландшафте.



Рис. 6.9. Ландшафтные районы Карельского перешейка
 I – Выборгский (сельговый) ландшафт, II – Северо- Западное Приладожье, III – Центральная возвышенность,
 IV – Привуоксинская низина, V – Приморский ландшафт

Сбор материалов проводили по всем гидрохимическим компонентам озерных экосистем (взвешенное вещество, растворенный кислород, рН, цветность, биогенные элементы) и биологическим сообществам. Оценка трофического состояния озерных вод проводится на основе анализа изменения гидрохимических показателей, прежде всего концентрации биогенных элементов и органического вещества (БПК₅) и содержания хлорофилла «а» в планктоне [Carlson, 1977; OECD, 1982]. При определении большинства химических компонентов использовались стандартные методы, широко применяемые в гидрохимии [Алекин, 1954].



Рис. 6.10. Полевой отряд 2012 г.: В.П. Беляков, Е.В. Станиславская, А.Л. Афанасьева, В.И. Ященко, И.В. Сотников, А.Г. Русанов, Е.Н. Чеботарев, Д.С. Бардинский

Во всех ландшафтных районах озера заметно различаются по морфометрическим характеристикам и гидрохимическим особенностям (рН, цветности, содержанию органического вещества и биогенных элементов) и уровню трофности. Площадь озер варьировалась от 0,2 до 10 км², максимальные глубины – от 1,5 до 22 м. Наиболее крупные из них – Красное, Судаковское, Красавица и Красногвардейское. Площадь большинства озер меньше 1 км². Во всех районах исследованы как глубокие, так и мелкие озера, но в среднем, озера сельгового ландшафта и центральной возвышенности характеризуются большими глубинами, чем озера Приморского ландшафта. Наиболее глубоководные озёра – Воробьёво, Берестовое. Во всех глубоких озерах отмечалась термическая стратификация, слой термоклина располагался на глубине 4–6 м и, как правило, наблюдалось снижение растворенного кислорода в придонном слое и дефицит кислорода у дна.

Оценка современного состояния 50 разнотипных озер центральной части Карельского перешейка показала, что по содержанию общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и хлорофилла-а в планктоне трофический статус исследованных озер колеблется от олиготрофного до гипертрофного, большинство исследованных озер – мезотрофные. Биомасса фитопланктона колебалась от 0,4 до 70,5 г/м³. Прослежена прямая зависимость биомассы фитопланктона от трофического статуса озер. По мере увеличения трофности возрастает не только общая биомасса водорослей, но и доля в ней цианопрокариот. Биомасса зоопланктона в исследованных водоемах изменялась от 0,4 до 12,1 г/м³. Она возрастала

с увеличением трофического статуса озер, но четкой корреляции с трофическим статусом не отмечается, так как количественные показатели зоопланктона в большей степени определяются морфометрическими особенностями и сезонной изменчивостью. Наибольшие величины отмечены в эвтрофных озерах, в гипертрофных мелководных они значительно ниже. В целом, прослеживается тенденция увеличения биомассы простейших с увеличением трофического статуса озер. Наибольшая численность и биомасса простейших зафиксирована в гипертрофных озерах – 2,2 млн/м³ и 0,4 г/м³ соответственно. Доля простейших от биомассы зоопланктона также возрастала с увеличением трофического статуса озер, что связано с увеличением доли мелкоклеточных форм в гипертрофных озерах, хотя корреляция достаточно слабая.

Под влиянием эвтрофирования изменяется не только структура и биомасса сообществ, но и соотношение между ними, что может служить индикатором состояния водоема. Соотношение биомасс зоо- и фитопланктона снижается по мере увеличения трофического статуса озер. Наименьшим оно было в мелководных гипертрофных озерах, что подтверждает снижение активности зоопланктона по сравнению с фитопланктоном, и, следовательно, снижение деструкционных процессов и устойчивости экосистем по мере эвтрофирования. Комплексное обследование озер Карельского перешейка, приуроченных к различным геоморфологическим районам и различающихся по морфометрии, гидрохимическим характеристикам и уровню трофии, в июле 2012–2013 гг. показало, озера Привуоксинской низины и Приморского района отличаются значительно более высоким содержанием хлорофилла-*a* и низкой прозрачностью воды, т.е. в целом, имеют более высокий трофический статус, чем озера остальных ландшафтных районов Карельского перешейка. Расположенные в курортной зоне озера Приморского района подвергаются более длительному и интенсивному антропогенному воздействию. Многофакторный анализ методом главных компонент (АГК), использованный для выявления основных направлений изменчивости гидрохимического режима озер Карельского перешейка, подтвердил, что основными факторами формирования озерных экосистем Карельского перешейка и их трофического статуса являются эвтрофирование и гумификация.

Практически во всех озерах произошли существенные изменения гидрохимического состава воды, понизилась прозрачность воды. Наименьшие изменения отмечены на севере перешейка, в озерах Сельгового района и северного Приладожья, но и здесь в ряде озер наблюдается интенсивное эвтрофирование. Среди них уже встречаются слабо-эвтрофные (Лесково и Б. Заветное) и эвтрофные (Лопата). Наиболее эвтрофированы озера Приморского ландшафта, расположенные в курортном районе. Большинство из них – эвтрофные и даже гипертрофные, характеризующиеся цветением воды из-за массового развития сине-зеленых водорослей. Исследования показали, что уровень развития фитопланктона в озерах Карельского перешейка, как и прежде, зависит от содержания фосфора в воде, что было установлено ранее для озер региона [Стравинская, Трифонова, Ульянова, 1985; Особенности формирования качества..., 1984].

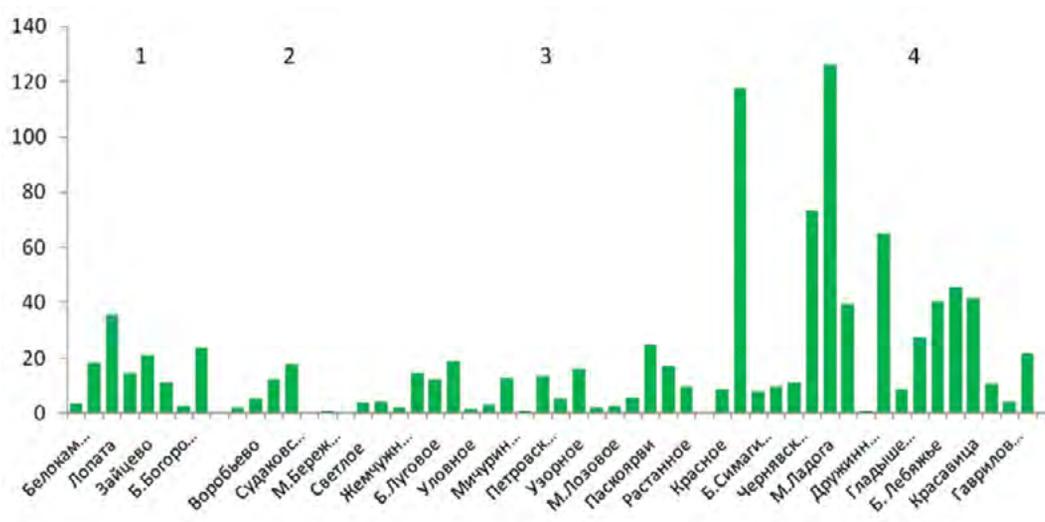


Рис. 6.11. Содержание хлорофилла-*a* (мкг/л) в планктоне исследованных озер Карельского перешейка. 1 – Сельговый ландшафт, 2 – Приладожье, 3 – Центральная возвышенность, 4 – Приморский ландшафт

Распределение озер по градиенту содержания хлорофилла «а» в планктоне является наиболее четким общепринятым показателем трофического состояния водоемов [Carlson, 1977; OECD, 1982]. В исследованных озерах оно изменялось от 0,2 до 130 мкг/л (рис. 6.11). Большинство озер с содержанием хлорофилла-а – 5–20 мкг/л – мезотрофные. В олиготрофных и дистрофных озерах оно составляло 0,2–3,5 мкг/л. Наиболее продуктивные, эвтрофные озера характеризуются высоким содержанием хлорофилла – 28–53 мкг/л. Максимальные величины – 100 мкг/л и выше отмечены в озерах Приморского ландшафта Балаково и М. Ладога, которые можно считать гипертрофными. И хотя во всех ландшафтных районах отмечены эвтрофные озера, очевидно, что трофический статус озер Приморского ландшафта значительно выше, чем озер остальных районов.

Для выявления основных направлений изменчивости гидрохимического режима и трофического статуса озер Карельского перешейка использовали метод АГК [Трифонов, Афанасьев, Русанов, 2016] (рис. 6.12). Все переменные (площадь озера, максимальная глубина, прозрачность по диску Секки, рН, цветность, ХПК, БПК₅, насыщение кислородом, температура воды, общий фосфор, общий азот, содержание хлорофилла-а были преобразованы логарифмированием для нормализации распределения. АГК выполнялся в программе Canoco 4 [Ter Braak, Verdonschot, 1995].

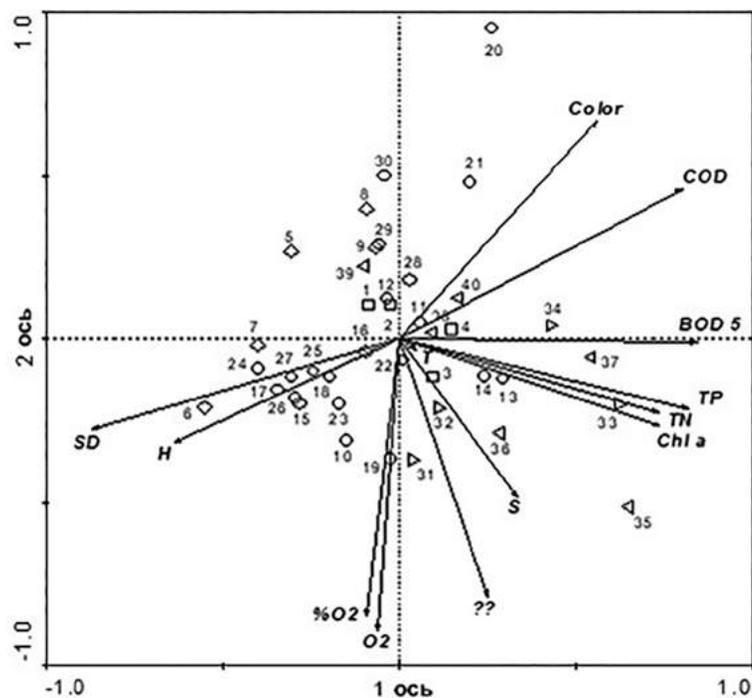


Рис. 6.12. Распределение морфометрических, гидрохимических и трофических параметров и озер Карельского перешейка в пространстве первых двух осей АГК

Параметры: Color – цветность, COD – ХПК, BOD₅ – БПК₅, pH, O₂ – содержание кислорода, %, O₂ – насыщение кислородом, T – температура воды, SD – прозрачность, S – площадь озера, H – максимальная глубина, TP – общий фосфор, TN – общий азот, Chl a – хлорофилла-а.

Озера: 1) Белокаменное, 2) Лесково, 3) Б. Заветное, 4) Лопата, 5) Б. Бережное, 6) Воробьево, 7) Снетковское, 8) Щукинское, 9) Нарядное, 10) Мичуринское, 11) Медведевское, 12) Охотничье, 13) Журавлевское, 14) Б. Морозовское, 15) Светлое, 16) Жемчужина, 17) Берестовое, 18) Узорное, 19) Борисовское, 20) М. Луговое, 21) Б. Луговое, 22) Вольнское, 23) Петровское, 24) Б. Щучье, 25) Раздолинское, 26) Уловное, 27) Б. Борково, 28) Чернявское, 29) Затишье, 30) М. Лозовое, 31) Красное, 32) Правдинское, 33) Вишнево, 34) Волочаевское, 35) Победное, 36) Б. Лебяжье, 37) Балаково, 38) Б. Симагинское, 39) Дружинное, 40) Щучье.

Ландшафтные районы: квадраты (1–4) – Сельговый район, ромбы (5–9) – Северо-Западное Приладожье, кружки (10–30) – Центральная возвышенность, треугольники (31–34) – Привуоксинская низина, (35–40) – Приморский район.

Дисперсионный анализ применялся для оценки различий средних значений отдельных гидрохимических параметров между ландшафтными группами озер. При статистической значимости общего дисперсионного анализа проводилось парное сравнение средних данных, с применением критерия LSD (наименьшая значимая разность). Сравнение этих параметров показало, что в группе

озер Привуоксинской низины и Приморского района концентрация общего фосфора и азота достоверно выше, чем в Северо-Западном Приладожье и Центральной возвышенности. Соответственно, озера Привуоксинской низины и Приморского района отличаются значительно более высоким содержанием хлорофилла-*a* и низкой прозрачностью воды. В целом, озера Приморского района имеют более высокий трофический статус, чем озера Центральной возвышенности и Северо-Западного Приладожья. Исследования показали, что уровень развития фитопланктона в озерах Карельского перешейка, как и прежде, зависит от содержания фосфора в воде, что было установлено ранее для озер региона [Стравинская, Трифонова, Ульянова, 1985; Трифонова, 1979]. Тем самым, АГК подтвердил, что основными факторами формирования озерных экосистем Карельского перешейка и их трофического статуса является эвтрофирование и гумификация.

6.3. Водоёмы урбанизированных ландшафтов

В отличие от большинства водоемов естественных ландшафтов, многочисленные городские пруды, озера, водохранилища, карьеры постоянно подвержены сильному комплексному антропогенному воздействию. В результате, естественные процессы формирования качества воды и функционирования их экосистем, как правило, нарушены из-за высокого уровня постоянно действующей антропогенной нагрузки и низкой самоочищающей способности. При этом наиболее уязвимыми по отношению к внешним негативным воздействиям оказываются слабопроточные и бессточные водоемы.

Систематические работы по изучению малых водоемов урбанизированных территорий начались в Институте озераведения в середине девяностых годов прошлого века, хотя отдельные водоемы, например, крупнейший внутренний водоем Санкт-Петербурга – водохранилище Сестрорецкий Разлив, достаточно детально изучались и ранее. Под руководством д.ф.-м.н. Сергея Алексеевича Кондратьева при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в 1996–1998 гг. были выполнены исследования в рамках проекта *«Водные объекты в условиях интенсивного техногенеза: методология мониторинга и критерии допустимой нагрузки»*. В работе также принимали участие сотрудники Государственного гидрологического института (ГГИ). В качестве объекта исследования была выбрана водная система оз. Лахтинский Разлив, расположенная в северо-западной части Санкт-Петербурга, включающая также систему Суздальских озер – самых крупных естественных водоемов города, имеющих ледниковое происхождение, водохранилище на р. Каменке, Орловский карьер, реки Каменку, Старожиловку и Черную.

В результате выполненных исследований сформулированы методологические принципы организации и проведения мониторинга водных объектов урбанизированных территорий. Разработанная методология была практически реализована при проведении натурных исследований на оз. Лахтинский Разлив и водных объектах его водосборного бассейна. На основе полученных данных выполнена комплексная оценка текущего состояния изучаемой территории по гидрологическим и гидрохимическим показателям, загрязнению почв и снежного покрова. Для хранения, представления и обработки данных полевых исследований была разработана ГИС «Лахта». Согласно разработанной в рамках проекта методике выполнен расчет критических нагрузок металлами на оз. Нижнее Суздальское. Разработаны модели, позволяющие описывать транспорт и трансформацию соединений металлов в водной массе и донных отложениях водоемов и определять условия превышения критических значений концентраций загрязняющих веществ с учетом динамики изучаемых процессов. Установлено, что городские водоемы являются геохимическими барьерами на пути миграции биогенных и загрязняющих веществ к крупным водотокам и далее в Невскую губу Финского залива и аккумулируют в донных отложениях поступающие из внешних источников химические вещества. Основные результаты исследования представлены в ряде публикаций [Водные объекты в условиях..., 1997; Водные объекты в условиях..., 1998; Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002]. В 1999–2001 гг. при поддержке РФФИ были выполнены исследования по проекту *«Водные объекты мегаполисов: критерии экологического состояния и концепция рационального управления»* [Водные объекты мегаполисов..., 2001]. Для оценки экологического состояния водных объектов урбанизированных территорий был предложен комплекс индикаторов

торов, включающий химические, биологические и санитарно-бактериологические показатели [Индикаторы состояния водоемов..., 2000]:

- содержание и структура органического вещества в водоеме: взвешенное и растворенное органическое вещество, а также фракции растворенного органического вещества с анионными, катионными и нейтральными свойствами;
- санитарно-бактериологические индикаторы: содержание лактозоположительных кишечных палочек в воде и донных отложениях, соотношение значений общего микробного числа при 22 и 37°C, а также наличие патогенных микроорганизмов в воде и донных отложениях;
- биоиндикаторы: концентрация хлорофилла-*a*, видовой и количественный состав зоопланктона и зообентоса, наличие патологии в виде опухолеподобных образований у личинок планктонных ракообразных;
- степень загрязнения донных отложений водоемов, являющаяся показателем уровня внешней нагрузки за значительные интервалы времени и истории техногенного загрязнения урбанизированных территорий;
- соотношение внешней и внутренней нагрузки, отражающее уровень вторичного загрязнения водоема за счет поступления химических веществ в воду из донных отложений, значимость которого возрастает по мере ухудшения экологического состояния водоема;
- критическая нагрузка, определяемая как уровень внешней нагрузки, который приводит к достижению допустимого (критического) уровня концентрации вещества в воде, донных отложениях или биоте. Превышение допустимого уровня содержания токсического вещества и критической нагрузки приводит к антропогенному экологическому регрессу водоема.

На основе предложенных индикаторов дана оценка состояния 11 водоемов Санкт-Петербурга, расположенных в различных частях мегаполиса и испытывающих бытовую и техногенную нагрузки различного происхождения и интенсивности. Натурные исследования на них были выполнены в 2000 г. Для хранения, обработки и визуализации архивной информации и данных натурных наблюдений использована геоинформационная система «Водоемы Санкт-Петербурга».

Установлено, что по всему комплексу индикаторов наиболее неблагоприятным состоянием отличается Охтинское водохранилище, принимающее сточные воды предприятий и канализационные стоки, и малопроточный пруд в Московском парке Победы, характеризующийся интенсивным рекреационным использованием. Высокая степень загрязнения по ряду показателей отмечена также в озерах Верхнем Суздальском и Лахтинском Разливе и водохранилище Сестрорецкий Разлив. Следствием высокого уровня биогенных нагрузок на водоемы (оз. Нижнее Суздальское, вдхр. Сестрорецкий Разлив, пруды Московского парка Победы, Ольгинский и Юнтоловский) явилось антропогенное эвтрофирование, также приведшее к ухудшению качества воды и общего экологического состояния водоемов. Таким образом, основными причинами ухудшения экологического состояния водоемов урбанизированных территорий является сброс промышленных и бытовых сточных вод, а также интенсивное рекреационное использование водоемов. К числу природных факторов, препятствующих самоочищению ряда водоемов, следует отнести их низкую проточность.

На примере оз. Нижнего Суздальского показано, что в городских водоемах, испытывающих на протяжении нескольких десятилетий сильное антропогенное воздействие, внутренняя нагрузка металлами и биогенными элементами достигла величин, соизмеримых с внешним их поступлением, и является значимой составляющей в формировании суммарной нагрузки. Такое соотношение внешней и внутренней нагрузок свидетельствует о том, что донные отложения озера являются реальным источником вторичного загрязнения его водной массы.

В рамках выполнения проекта разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать внешнюю нагрузку на озеро, оценивать содержание вещества в водной массе и определять значения критической нагрузки, исходя из заданных значений предельно допустимых концентраций вещества. Модель учитывает основные составляющие внешней нагрузки: точечные источники поступления химических веществ в водоем, вынос с водосбора (с учетом структуры его подстилающей поверхности) и атмосферные выпадения на поверхность озера. В результате применения данной модели установлено, что высокий уровень загрязнения водоемов Санкт-Петербурга приводит к тому, что реальная концентрация металлов в водоемах превышает критическую, поэтому рассчитанные значения критических нагрузок могут быть отрицательными. Таким образом, для достижения крити-

ческого уровня содержания металла в водоеме требуется изъятие вещества в количестве, соответствующем рассчитанному отрицательному значению критической нагрузки. При этом результаты расчетов существенно зависят от выбора значения критического уровня (в данном случае – ПДК). Существенные затруднения при расчете критических нагрузок возникают из-за отсутствия официально утвержденных ПДК для большого числа загрязняющих веществ, характерных для водоемов урбанизированных территорий. Важным результатом исследования явилась разработка концепции мониторинга водных объектов урбанизированных территорий и основного алгоритма принятия управленческих решений, направленных на снижение негативного антропогенного воздействия на водные объекты города [Кондратьев, 2000; Интегрированное управление водными..., 2001].

В начале 2000-х гг. работы по оценке состояния городских водоемов и разработке мероприятий по их оздоровлению и восстановлению были поддержаны Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга (далее Комитет). На тот момент неудовлетворительное экологическое состояние значительной части городских водных объектов вызывало все большую озабоченность населения и городских властей. Восемьдесят процентов водных объектов Санкт-Петербурга классифицировались как грязные, при этом многие из них имели эвтрофный или гипертрофный статус [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002]. На основе ГИС «Водные объекты Санкт-Петербурга», содержащей информацию по 265 водоемам города, выполнен анализ методов восстановления водоемов с учетом их возможного применения в условиях Санкт-Петербурга. Специалисты ИНОЗ РАН пришли к выводу, что проблема восстановления и реабилитации городских водоемов может быть решена в результате реализации комплекса мер как на водосборном бассейне (внешние меры), так и в самом водоеме (внутренние меры). Выбор оптимального комплекса оздоровительных и восстановительных мероприятий зависит от вида антропогенного воздействия, характера и глубины негативных последствий этого воздействия на водную экосистему, а также специфических особенностей конкретного водного объекта. В любом случае, восстановление водного объекта надо начинать с выявления и, по возможности, устранения причины экологического неблагополучия, т.е. с осуществления необходимых мероприятий на водосборном бассейне с тем, чтобы не допустить или уменьшить поступление в водоем продуктов эрозии и дефляции, биогенных и загрязняющих веществ.

В свете современных требований по оценке инвестиционной привлекательности городских территорий предложена общая схема эколого-экономической оценки использования, сохранения и восстановления водоемов. Схема включает сбор материалов о характеристиках городских водоемов, разработку ГИС, расчет инвестиционной привлекательности водоемов, проведение оптимизационных эколого-экономических оценок, расчет минимальной стоимости восстановительных работ, выполняющийся при условии несоответствия характеристик водоема требованиям нормативов водопользования. Для классификации городских водоемов по признаку их инвестиционной привлекательности разработан метод экспертной оценки, основанный на анализе следующих признаков: ландшафтная характеристика водосбора, состояние прибрежной зоны, морфометрические характеристики, проточность, сведения о современном использовании водоемов, характеристика доступности, изученность, уровень антропогенной нагрузки, состояние почвенного покрова, характеристика экологического состояния, сведения об очистке водоемов. Разработана схема выбора оптимального варианта многоцелевого использования водоемов. В результате применения эколого-экономических моделей для ряда городских водоемов рассчитаны значения максимального дохода и оптимальные объемы разрешенных видов водопользования, а также коэффициенты значимости ресурсов по их вкладу в оптимальное решение [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002].

Очередным этапом в исследовании водоемов урбанизированных территорий явилась разработка *системы ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на городских водоемах*, выполненная под научным руководством академика РАН Владислава Александровича Румянцева и к.г.н. Натальи Викторовны Игнатъевой [Румянцев, Игнатьева, 2006; Кондратьев, Игнатьева, 2015]. Работа проводилась по заказу Комитета, начиная с 2002 г. Необходимость проведения исследований в этом направлении была продиктована тем, что из-за трудоемкости и дороговизны выполнения работ в рамках Федеральной системы мониторинга Роскомгидромета подавляющее большинство водоемов города находилось вне какого бы то ни было экологического контроля, что представляло угрозу экологической безопасности населения.

Достижение оперативности контроля экологического состояния водоемов в рамках разработанной системы обеспечивается тем, что в ее основу положено небольшое число показателей, дающих интегральное представление о развитии в водоеме негативных процессов эвтрофирования, загрязнения и закисления. Определение этого комплекса показателей позволяет достаточно адекватно оценить качество воды и состояние водоема в целом, включая водную массу, поверхность водоема и береговую зону, «отклик» биологических сообществ, а также выявить причины экологического неблагополучия. В 2017 г. в рамках работ по Государственному контракту с Комитетом «*Обеспечение экологической безопасности водных объектов на территории Санкт-Петербурга*» система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций была усовершенствована и оптимизирована с учетом результатов ее практической реализации на водоемах города, а также использования инновационных методов обследования водных объектов, в том числе, искусственных сенсорных систем [Mimicking Daphnia magna..., 2014] и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Поздняков, Игнатьева, 2017] (рис. 6.13). В результате современный комплекс исследований в рамках оптимизированной системы оперативной диагностики экологического состояния городских водоемов включает:

- проведение гидрохимических исследований на акваториях водоемов, включающих определение значений температуры, водородного показателя pH, удельной электропроводности, содержания растворенного кислорода, диоксида углерода, биогенных элементов (в первую очередь, общего фосфора и нитритов), наличия токсических газов (H_2S , CH_4), органолептической характеристики – интенсивности запаха;
- проведение исследований фитопланктона на акваториях водоемов, включающих анализ видового состава и выявления доминирующих таксонов и групп водорослей (в том числе, сине-зеленых водорослей), определение содержания хлорофилла-*a* в воде и биомассы водорослей фитопланктона;
- проведение обследований макрофитных сообществ для оценки их видового состава, структуры и пространственного распределения, а также степени зарастания водоемов, в том числе, с помощью БПЛА;
- определение токсичности воды в терминах биотестирования с использованием искусственных сенсорных систем;
- проведение микробиологических и санитарно-гигиенических исследований для определения количества общих колиформных бактерий (ОКБ), общей численности бактериопланктона и численности сапрофитных бактерий (ОМЧ);
- проведение визуального обследования водной поверхности и береговой зоны водоема, в том числе, с помощью БПЛА, для выявления возможных источников загрязнения и характера негативных процессов, развивающихся в водоеме.

В рамках данной системы разработана методика измерения, включающая научно обоснованное предписание периодичности обследования водоемов, необходимого числа отобранных для анализа проб, месторасположения станций отбора проб, а также рекомендуемые методики аналитического определения контролируемых показателей. Оценка экологической ситуации на водоеме дается на основе полученных значений 16 показателей в соответствии с разработанной системой критериев, где для каждого из контролируемых показателей определен диапазон значений, соответствующих «относительно удовлетворительной», «напряженной» или «кризисной» ситуации.

Основным достоинством разработанной системы является то, что при резком сокращении материальных и трудовых затрат по сравнению с Федеральной системой мониторинга обеспечивается возможность оперативной оценки экологического состояния большого числа водоемов и выявления негативных процессов на ранней стадии их развития. Как показала апробация разработанной системы, выполненная на более чем 170 водоемах Санкт-Петербурга, для большинства водоемов результаты, полученные в рамках практического применения системы оперативной диагностики экологического состояния, являются достаточными для разработки оптимального комплекса оздоровительных мероприятий. Однако, если в результате такого обследования причины, приведшие к экологическому неблагополучию, или характер развивающихся в водоеме негативных процессов недостаточно ясны, то разработка оптимального комплекса оздоровительных мероприятий может потребовать более глубокого изучения водоема путем расширения состава контролируемых параметров. В этом случае результаты, полученные в рамках выполнения оперативной оценки, служат основой для дальнейших исследований, которые для конкретного водоема могут включать те или иные виды дополнительных работ.



Рис. 6.13. Снимок прудов Московского парка Победы, полученный с помощью БПЛА модели Phantom 2 в июле 2018 г. (фото М.О. Дудакова)

Критический анализ оздоровительных мероприятий на водоемах, применяемых в настоящее время в мировой практике, позволил очертить круг тех из них, выполнение которых является наиболее оптимальным в условиях города. В перечень мероприятий вошли: благоустройство водоохранных зон, прибрежных полос и прилегающих территорий; дноочистка; дноуглубление; заселение макрофитами; периодическое выкашивание воздушно-водной растительности; сбор плавающей растительности и подводное выкашивание макрофитов; увеличение проточности. На всех без исключения водных объектах рекомендована уборка мусора на акваториях, прибрежных полосах и береговых зонах.

Характер и план необходимых мероприятий на конкретном водоеме определяются на основе экспертных заключений, данных по результатам критического анализа значений всех контролируемых в рамках оптимизированной системы оперативной диагностики показателей [Игнатъева, 2015а; 2015б]. Выполнение полного комплекса работ на водоемах Санкт-Петербурга требует больших финансовых вложений, поэтому был определен приоритетный список водоемов, природоохранные мероприятия на которых нужно провести в первую очередь. В основу ранжирования водоемов в данном списке, помимо степени экологического неблагополучия, положена социальная значимость водоема. Результаты выполненных работ явились информационной основой для принятия руководством города наиболее оптимальных решений о проведении различного рода водоохраных мероприятий.

Исследование, выполненное в 2009–2011 гг. в рамках проекта *«Разработка показателей для оценки состояния водоемов урбанизированных территорий»* программы Отделения наук о Земле РАН, представляло собой первый опыт разработки теоретических основ оптимизации комплекса контролируемых показателей экологического состояния городских водоемов в зависимости от природы, характера и интенсивности антропогенного воздействия, определяемых, в свою очередь, масштабами города, степенью его индустриализации и структурой промышленного производства. Работы выполнялись

под научным руководством к.г.н. Натальи Викторовны Игнатъевой и к.б.н. Виктора Павловича Белякова. Для различных условий разработаны варианты комплекса показателей, включающего гидрохимические, геохимические, гидробиологические (фитопланктон, зоопланктон, бактериопланктон, зообентос), санитарно-гигиенические и токсикологические характеристики водоема.

Апробация разработанного комплекса показателей на ряде водоемов Санкт-Петербурга и малых городов, являющихся как административными районами Санкт-Петербурга (Петродворец, Красное село), так и расположенных в Ленинградской области (Колпино, Гатчина), показала высокую информативность большинства предложенных показателей и достаточность комплекса для достоверной оценки экологического состояния водоема. Результаты исследования свидетельствуют о том, что численность населения городов практически не оказывает влияния на характер экологических последствий антропогенного воздействия на водоемы. Первостепенное значение здесь имеет природа, характер и интенсивность самого воздействия. Однако выявлено, что в целом трофический статус водоемов мегаполиса выше, чем водоемов малых городов того же региона.

Несоответствия в оценках трофического статуса и степени загрязнения водоемов, возникшие при использовании различных групп показателей разработанного комплекса в ходе его апробации, свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к оценке состояния городских водоемов. Причиной подобных несоответствий является нарушение под воздействием антропогенных факторов причинно-следственных связей, характерных для природных водоемов. Показано, что при оценке экологического состояния необходимо учитывать природные особенности водоема и оценивать его способность к саморегуляции и самоочищению [Комплексная оценка экологического состояния..., 2011]. Результаты исследования вносят существенный вклад в более глубокое понимание механизмов ответной реакции экосистемы водоема и отдельных ее компонентов на различные виды антропогенных воздействий.

Одним из важнейших результатов исследования явилась разработка нормативов состояния городских водоемов по каждой группе показателей. При разработке нормативов учитывалось то, что большая часть водоемов урбанизированных территорий может быть классифицирована как водоемы культурно-бытового водопользования, поэтому к нормированию их состояния необходимо подходить, прежде всего, с позиции их безопасности для здоровья человека, животных, птиц, гидробионтов, а также с эстетических позиций.

Дальнейшие исследования водоемов урбанизированных территорий, выполненные в рамках проекта *«Особенности изменения химико-биологических показателей как основа оценки и прогнозирования состояния водных экосистем в условиях комплексного антропогенного воздействия»* программы Отделения наук о Земле РАН в 2012–2014 гг., были нацелены на более глубокое понимание механизмов ответной реакции экосистемы водоема и отдельных ее компонентов на различные виды антропогенных воздействий. Работы выполнялись под руководством к.г.н. Н.В. Игнатъевой и к.б.н. В.П. Белякова. Для проведения натурных исследований были выбраны три озерно-речные системы, расположенные на территории Санкт-Петербурга и его ближайших окрестностей: 1 – оз. Нижнее Суздальское с реками Старожиловкой (приток) и Каменкой (сток); 2 – Дудергофские озера с р. Дудергофкой; 3 – р. Охта с Охтинским водохранилищем. Исследованные водные системы принадлежат различным геохимическим ландшафтам, при этом как системы в целом, так и отдельные их звенья испытывают антропогенные воздействия различных видов и интенсивности. В результате исследования установлено, что в зависимости от геохимического фона последствия антропогенных воздействий на экосистемы будут различными [Игнатъева, 2014]. Кроме того, разные биологические сообщества в различной степени и в разное время (в годовом цикле) реагируют на антропогенное воздействие. Анализ данных позволил дифференцировать различия, обусловленные действием природных и антропогенных факторов. Обнаружена индикаторная роль биологических сообществ в выявлении загрязнения водных систем, а также их способности к самоочищению. В каждой из систем выявлены участки, наиболее «трансформированные» в результате антропогенного воздействия.

Установлено, что вызванное действием антропогенных факторов нарушение причинно-следственных связей, характерных для природных водоемов, во многих случаях приводит к неоднозначным и даже противоречивым оценкам степени экологического благополучия того или иного водоема или участка водной системы при использовании одной или небольшого числа групп показателей. Кроме того, значения как гидрохимических, так и гидробиологических показателей отличаются

нестабильностью во времени, особенно в логических системах. Подтверждена необходимость комплексного подхода к изучению водных систем, охватывающего практически все звенья трофической цепи, а также гидрохимический режим и геохимический фон.

Разработки, выполненные по проектам программ Отделения наук о Земле РАН, способствовали созданию теоретических основ функционирования водных экосистем в условиях комплексного антропогенного воздействия. Результаты работ позволяют оптимизировать систему контроля состояния городских водоемов и систему водопользования и могут служить основой прогноза состояния водных систем, подверженных тем или иным видам антропогенного воздействия.

Отдельные водоемы и водные системы Санкт-Петербурга изучались в Институте озераведения на протяжении последних десятилетий периодически или постоянно. К ним относятся Суздальские и Дудергофские озера, водохранилище Сестрорецкий Разлив.

Система Суздальских озер, самых крупных естественных водоемов г. Санкт-Петербурга, испытывает постоянный антропогенный пресс со стороны урбанизированного ландшафта: на их водосборе расположены промышленные предприятия, автомагистрали, свалки, сельскохозяйственные угодья; непосредственно на берегах озер ведется строительство жилых массивов. Кроме того, озера традиционно используются как зоны массового отдыха [Водные объекты мегаполисов..., 2001]. Верхнее, Среднее и Нижнее Суздальские озера, расположенные в северо-западной части Санкт-Петербурга, входят в систему водосбора оз. Лахтинский Разлив и имеют сток через р. Каменку в Невскую губу Финского залива. Озера расположены каскадом (цепочкой) в направлении с юга на север и соединены между собой протоками. По площади исследованные водоемы относятся к разряду малых, с площадью зеркала менее 1 км², имеют простые очертания с незначительной изрезанностью, глубоко вдающиеся заливы отсутствуют. По морфометрии, гидрологии и гидрохимии Верхнее и Среднее Суздальские озера достаточно сходны, последнее отличается меньшей площадью зеркала и объемом водной массы и имеет более выровненную котловину. Водоемы аккумулятивные с замедленной проточностью, димиктические, термическая стратификация в них неустойчива и нарушается в летний период. Прозрачность воды в течение периода наблюдения изменялась от 0,9 до 2,6 м. Наиболее крупное и мелководное Нижнее Суздальское озеро – аккумулятивно-транзитное среднепроточное, водная масса обновляется 5–6 раз в год [Богословский, 1960], полимиктическое; прозрачность, как правило, менее 1,0 м. До 1990-х гг. Институт озераведения РАН в рамках тем Госзадания и при финансовой поддержке Комитета с 1995 г. проводит комплексные исследования водоемов озерно-речной системы, включающей Суздальские озера [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002; Павлова, 2004; Трифонова, Павлова, 2005], при этом основное внимание уделяется гидрохимическому режиму, фитопланктону, высшей водной растительности и геохимии донных отложений озер.

Большие уклоны местности в верхней части водосборного бассейна способствуют интенсивному выносу веществ, аккумулятором которых служит мелководное Нижнее Суздальское озеро [Водные объекты мегаполисов..., 2001]. Увеличение биогенной нагрузки на водоемы наблюдается с конца 1990-х гг. Содержание общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$) – главнейших биогенных элементов, в Верхнем и Среднем Суздальских озерах за время исследования изменялось в пределах 0,017–0,038 мг P/л и 0,62–1,52 мг N/л, что соответствует мезотрофному статусу. В Нижнем Суздальском озере за период наблюдений оно увеличилось почти в два раза [Региональные проблемы сбалансированного..., 1999; Павлова, Игнатъева, 2012]. В настоящее время по содержанию $P_{\text{общ}}$ – до 0,094 мг P/л в центральной части и до 0,135 мг P/л – в зарастающей северной, Нижнее Суздальское озеро характеризуется как высокоэвтрофное [ОЕСД, 1982]. Для всех трех озер характерны высокие концентрации общего азота, основная часть которого находится в составе органических соединений. Пространственное распределение форм фосфора и азота в поверхностном слое Суздальских озер летом 2004 г. представлено на рис. 6.14. Аналогичное пространственное распределение в поверхностном и придонном слоях получено для всех основных гидрохимических характеристик озер: компонентов основного ионного состава, удельной электропроводности, водородного показателя pH, растворенного кислорода, органического вещества (по ХПК), легкоокисляемого органического вещества (по БПК₅), цветности, взвесей, фенолов, нефтяных углеводородов, а также хлорофилла-а. Кроме того, те же показатели определены на 8 станциях на протяжении р. Старожилки – основного притока Нижнего Суздальского озера.

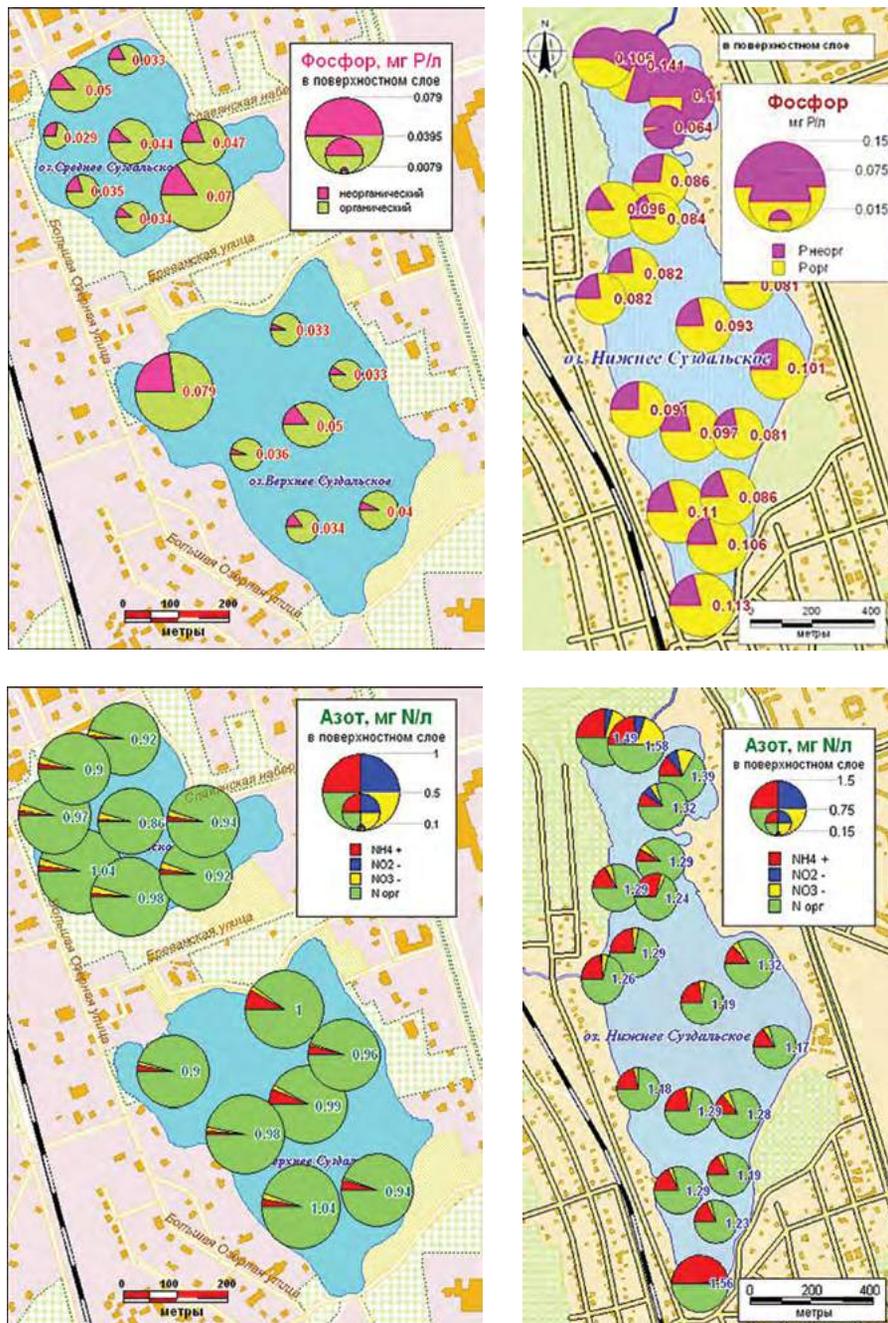


Рис. 6.14. Пространственное распределение концентраций форм фосфора и азота в поверхностном слое Суздальских озер летом 2004 г.

Результаты выполненных гидрохимических исследований Суздальских озер свидетельствуют о том, что интенсивное антропогенное воздействие в течение длительного периода времени привело к негативным последствиям. Наиболее загрязненные и эвтрофируемые зоны Верхнего и Среднего Суздальских озер расположены в основном в местах, испытывающих наибольшую рекреационную нагрузку (пляжи, места несанкционированных стоянок личного автотранспорта), а также вблизи автодорог. В целом, по степени проявления негативных последствий антропогенного воздействия экологическое состояние Среднего озера оценено как более благополучное по сравнению с Верхним озером. На Нижнем Суздальском озере зонами, наиболее неблагоприятными с позиции загрязнения и/или эвтрофирования, являются северный мелководный район озера, относительно изолированный от остальной акватории из-за обильно развитой водной растительности, и южная оконечность озера, где также отмечено наличие застойной зоны.

Установлено, что одним из главных источников загрязнения Нижнего Суздальского озера, особенно его северной части, является его основной приток – р. Старожиловка. С водами реки в озеро поступает существенное количество биогенных элементов (фосфора и азота), причем в основном в неорганических, биологически доступных формах, а также сульфатов, хотя поступление этого иона за последние годы снизилось.

Составлена схема распределения водной растительности Нижнего Суздальского озера и оценена степень зарастания озера макрофитами, составляющая в целом по всем видам водной растительности 24,1 %. Установлено, что заросли макрофитов в северной части озера играют двоякую роль в формировании экологической обстановки на озере в целом. С одной стороны, они препятствуют массообмену между северной частью озера и остальной водной массой, в результате чего северный район можно охарактеризовать как застойную зону, где происходит накопление загрязняющих и биогенных веществ, поступающих в эту часть озера как с водами р. Старожиловки, так и со склоновым стоком. С другой стороны, водная растительность играет роль естественного барьера, препятствующего распространению загрязнений и избыточного количества биогенных веществ в южном направлении, в основную водную массу озера. На основе результатов проведенного в 2004 г. обследования разработаны рекомендации, включающие комплекс внутренних и внешних мер по обеспечению экологической безопасности и выполнению природоохранных работ на Суздальских озерах и водосборе р. Старожиловки.

Наиболее детально, начиная с 1995 г., изучался фитопланктон Суздальских озер. Пробы фитопланктона отбирались в течение вегетационного сезона 1–2 раза в месяц на станциях, расположенных на наиболее глубоких участках озер и на литорали. Всего за период исследования было обработано около 1000 количественных и качественных проб.

Верхнее Суздальское озеро. В начале 1970-х гг. фитопланктон водоема характеризовался как хлорококково-динофитовый; биомасса изменялась от 2,16 до 11,39 мг/л, основными доминантами были зеленые водоросли – *Scenedesmus obliquus* (Turp.) Kütz. и др. [Гутельмахер, 1986]. Во второй половине 1990-х гг. в период увеличения биогенной нагрузки, связанного с активным освоением водосбора, уровень фитопланктона составлял в среднем за сезон 2,01–2,80 мг/л; содержание хлорофилла-*a* изменялось от 2,53 до 6,90 мкг/л. Наиболее массовыми были зеленые хлорококковые водоросли – *Coelastrum reticulatum* (Dang.) Senn, *Tetraedron minimum* (A.Br.) Hansg., мелкие десмидиевые, динофлагелляты и диатомеи. В первой половине 2000-х гг. концентрации биогенных элементов в водоеме постепенно стабилизировались. Среднесезонные величины в 2003–2018 гг. изменялись в пределах 1,81–4,25 мг/л. Роль Chlorophyta и Bacillariophyta снизилась, возросло значение криптонад, а фитопланктон в целом характеризовался как зелено-динофито-криптофитовый. В 2009–2011 гг. в озере отмечалось увеличение численности цианобактерий из рода *Dolichospermum* (*Anabaena*) и мелкоклеточных хлорококковых, среднее значение Cyanophyceae в целом возросло до 11–15 %.

Среднее Суздальское озеро. По данным А.А. Еленкина [1924], водоем в 1921 г. являлся «диатомово-сине-зеленым»; отмечалось массовое развитие *Asterionella formosa* Hass., *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) P.Wacklin, L.Hoffmann & J.Komárek и видов рода *Microcystis* – *M. aeruginosa* Kütz. emend. Elenk., *M. wesenbergei* Kom. В 1995–1997 гг. биомасса составляла в среднем за сезон 1,80–3,31 мг/л; концентрация Хл «а» изменялась от 0,97 до 19,16 мкг/л. Доминировали диатомовые (18–50 %) – *Cyclotella bodanica* Eulenk., *C. pseudostelligera* Hust., *A. formosa*, при участии золотистых – *Dinobryon* spp., *Chrysococcus rufescens* Klebs., и динофлагеллят – *Ceratium hirundinella* (O.F.M.) Bergh. Cyanophyceae даже при максимальном развитии составляли не более 9 % общей биомассы, наиболее массовыми были *Microcystis wesenbergei*, *Aphanocapsa delicatissima* и *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák. В 2003–2018 гг. средняя биомасса колебалась от 1,36 до 4,47 мг/л; как и в Верхнем Суздальском озере, более высокие величины отмечались в середине 2000-х гг. В настоящее время диатомеи определяют 23–40 % среднего количества и вместе с Cryptophyta и Dinophyta являются ведущими группами фитопланктона.

Нижнее Суздальское озеро в 1972 г. характеризовалось как диатомово-динофитовое, биомасса составляла 1,5–9,3 мг/л [Гутельмахер, 1986], наиболее массовыми были *Fragilaria tenera* (W. Sm.) Lange-Bert., виды рода *Stephanodiscus* и *Ceratium hirundinella*. Цианобактерии (*Snowella lacustris*) составляли не более 15% общей биомассы. В 1995–1997 гг. доминировали диатомовые (до 76 %) – *Aulacoseira ambigua* (Grun.) Sim., *Fragilaria* spp., и динофитовые водоросли; средняя биомасса составляла 7,2–11,0 мг/л (рис. 6.15). Содержание хлорофилла-*a* достигало 12,27–48,98 мкг/л (в среднем 25,14 мкг/л). В конце 1990-х гг. было отмечено увеличение фосфорной нагрузки с 1,0–1,6 до 2,6 г/м² [Алябина, Сорокин, 1999], что привело к снижению соотношения N/P [Региональные проблемы сбалансированного..., 1999]. Это определило резкое возрастание численности Cyanobacteria, в первую очередь *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. & Kom., повышение уровня биомассы фитопланктона и смену доминирующих групп и видов водорослей. Абсолютные величины биомассы достигали 43,59 мг/л, хлорофилла-*a* – 84,41 мкг/л; на стадии «цветения» численность *Planktothrix* превышала 380 млн кл./л, биомасса – 40 мг/л.

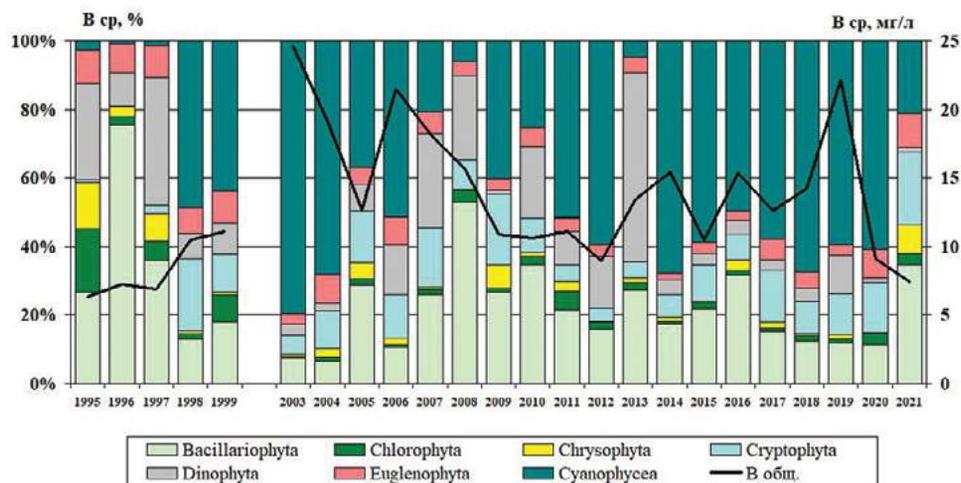


Рис. 6.15. Вклад (%) основных отделов водорослей и динамика среднесезонной биомассы (B ср) фитопланктона в поверхностном слое Нижнего Суздальского озера в 1995–1999 и 2003–2021 гг.

По результатам исследований основных показателей развития фитопланктона Нижнего Суздальского озера во второй половине 2010-х гг. был сделан вывод о постепенном увеличении уровня среднесезонных значений общей биомассы и содержания хлорофилла-*a* по сравнению с относительно благополучным периодом 2008–2013 гг. Начиная с 2014 г., цианобактерии вновь стали основным доминантом фитопланктона, постепенно вытесняя другие значимые группы, в первую очередь, диатомовые водоросли [Павлова, 2016]. Увеличение роли Cyanophyceae в планктоне определялось как гидрологическими условиями (снижение уровня), так и гидрохимическими – поступлением со стоком р. Старожиловки избыточных количеств биогенных элементов и снижением соотношения N/P [Игнатъева, 2014]. В 2015–2019 гг. средняя за сезон доля Cyanophyceae изменялась от 46 до 59 %, Bacillariophyta – от 13 до 32 %, в 2020 г. эти показатели составляли 60 и 11 % соответственно. При этом в 2021 г. из-за неблагоприятных погодных условий наблюдалось аномально слабое развитие цианобактерий и возрастание роли жгутиковых форм миксотрофного типа питания (криptomonеды, динофлагелляты, эвгленовые водоросли) (рис. 6.15). Тем не менее, количественные показатели развития фитопланктона Нижнего Суздальского озера соответствуют эвтрофному уровню по биомассе и высокоэвтрофному – по содержанию растительных пигментов.

В 2004 г. было выполнено геохимическое исследование донных отложений Верхнего и Среднего Суздальских озер, целью которого являлась оценка степени загрязнения донных отложений, выявление наиболее загрязненных участков дна и оценка рациональности проведения дноочистных работ. В поверхностных пробах донных отложений озер было определено содержание металлов (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Co, V), органического вещества (по величине потери при прокаливании – п.п.п.) и фосфора. Значение п.п.п. в донных отложениях Верхнего и Среднего Суздальских озер достаточно высоко и составляет 15,3–39,5 %. Содержание железа составляет 61–130 г/кг, марганца – 2,3–11 г/кг,

т.е. соответствует максимальным значениям для исследованных водоемов Санкт-Петербурга. Высокое содержание железа и марганца в первую очередь объясняется природным генезисом озер и высоким содержанием этих элементов в подстилающих материнских породах (особенность данной геохимической провинции). Техногенное загрязнение железом и марганцем не ярко выражено на фоне естественных природных процессов. Содержание свинца составляет 90–330 мг/кг. Можно предположить, что природное содержание свинца в илах данных озер несколько превышает фон в связи с особенностями макросостава донных отложений, однако, существенная часть валового содержания свинца приходится на техногенное загрязнение. Повышенное содержание цинка и меди – соответственно 44–220 и 27–110 мг/кг, также, очевидно, связано главным образом с техногенным загрязнением, при этом илы с высоким содержанием меди являются источником вторичного загрязнения водоема этим элементом в связи с его высокой миграционной способностью. Содержание в донных отложениях озер никеля, хрома, кобальта и ванадия составляет соответственно – 24–50, 20–65, 9,6–24 и 21–57 мг/кг. Содержание фосфора в донных отложениях Верхнего и Среднего Суздальских озер высоко, что связано, в первую очередь, с высоким содержанием органического вещества. Наибольшее содержание фосфора отмечено в глубоководных зонах озер (соответственно для Верхнего и Среднего – 3,15 и 3,45 мг/г), что является природной закономерностью, поскольку глубоководная зона водоема характеризуется как зона максимального осадконакопления, в которой аккумулируется наиболее тонкодисперсный осадок, способный ассоциировать наибольшее количество химических элементов, в том числе биогенных, а также металлов. На рис. 6.16 представлено распределение значения суммарного показателя загрязненности донных отложений (Z_c) озер.

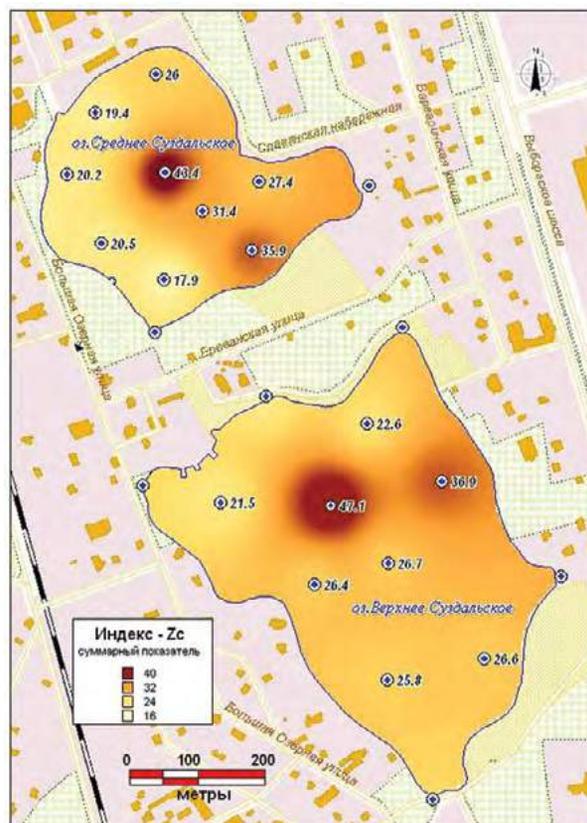


Рис. 6.16. Распределение значения суммарного показателя загрязненности донных отложений (Z_c) Верхнего и Среднего Суздальских озер

Несмотря на выявленную загрязненность донных отложений Суздальских озер, изъятие их части в качестве оздоровительной процедуры, учитывая естественное происхождение озер, высокую самоочищающую способность, а также социальную значимость, признано нецелесообразным, поскольку дноочистка является существенным вмешательством в процесс функционирования природной экосистемы.

Исследования *системы Дудергофских озер* выполнялись в ИНОЗ РАН в 1998, 2012–2014 и 2017–2018 гг. Дудергофские озера, расположенные в Красносельском районе Санкт-Петербурга, являются частью водной системы, которая берет свое начало на Дудергофской возвышенности, принадлежащей Ижорскому плато. Возвышенность прорезана двумя каньонообразными долинами, образованными приледниковыми потоками, в одной из которых расположена система озер – верхнее Дудергофское, среднее Долгое и нижнее Безымянное. Озера разделены плотинами, поэтому их гидрологический режим схож с режимом водохранилищ. Основная часть водосбора озер расположена на территории Ломоносовского и Гатчинского районов Ленинградской области, являющихся одними из наиболее развитых территорий области в сфере сельскохозяйственного производства. Кроме того, источниками загрязнения озер являются сток с территории малоэтажной застройки поселков Виллози и Дудергоф, сброс коммунально-бытовых сточных вод, автомобильные и железная дороги, интенсивное рекреационное использование. Сток из озер осуществляется по р. Дудергофке, протекающей, в том числе, по территории малоэтажной сельской застройки с приусадебными хозяйствами и по территории Санкт-Петербурга, что также отражается на ее экологическом состоянии. Повышенная природная минерализация вод системы, обусловленная ландшафтными особенностями Ижорского плато, сложенного карбонатными породами, создает повышенную буферную емкость, что обеспечивает относительную устойчивость системы по отношению к внешним негативным воздействиям. Тем не менее, комплексное антропогенное воздействие приводит к ухудшению экологического состояния озер, проявляющемуся, прежде всего, в развитии эвтрофирования. В настоящее время трофический статус озер по фосфору оценивается как мезо-эвтрофный [OECD, 1982; Игнатьева, 2015в].

Выполненные в последнее десятилетие исследования в основном подтвердили результаты, полученные ранее, в том числе, важную роль подземного питания в формировании химического состава воды озер – поступления подземных вод ордовикского водоносного комплекса – пресных, гидрокарбонатных магниевых-кальциевых с минерализацией 0,3–0,5 г/л. За период наблюдений средняя минерализация воды в озерах составляла 0,53 г/л. Величина удельной электропроводности воды озер составляла в среднем 834–836 мкСм/см. По основному ионному составу в разные сезоны воду озер Дудергофского и Долгого можно классифицировать как гидрокарбонатно-кальциевую или гидрокарбонатно-магниевую, а оз. Безымянного как гидрокарбонатно-кальциевую. Кислородный режим в целом благоприятный, при этом в весенне-летний период практически повсеместно отмечалось пересыщение воды кислородом до 176–255 %, вызванное интенсивным фотосинтезом. Общее содержание органического вещества в воде озер невелико, значения цветности воды низкие, при этом вода озер относительно богата легкоокисляемым органическим веществом. Отмечены единичные случаи превышения установленных нормативов по содержанию нефтепродуктов и фенолов. Среди исследованных металлов в ряде проб было отмечено незначительное превышение нормативов по содержанию свинца, кадмия, цинка. В целом, следует констатировать, что за последние два десятилетия состояние Дудергофских озер по контролируемым гидрохимическим показателям практически не изменилось.

Анализ гидрохимических данных позволил сделать вывод о том, что в Дудергофской водной системе от верхних звеньев по направлению к нижним происходит обогащение вод химическими веществами, в том числе, биогенными и загрязняющими. В результате, наиболее загрязненными водами характеризуется нижнее течение р. Дудергофки (на территории Санкт-Петербурга). Несмотря на природную относительную устойчивость системы, комплексное антропогенное воздействие, оказываемое городской средой, все же приводит к нарушению естественной сезонной динамики азота, величины pH, показателей органического вещества, росту содержания (абсолютного и относительного) нитритов и ионов аммония, взвесей и нефтепродуктов.

В результате проведенных ранее (1998, 2012–2014) исследований был сделан вывод, что сообщества фитопланктона Дудергофской системы являются достаточно стабильными, где по сравнению с концом 1990-х гг. не отмечено увеличение биомассы и растительных пигментов [Павлова, 2002; 2016]. Тогда по уровню и сезонной динамике планктонных водорослей Дудергофское и Безымянное озера были отнесены к мезотрофным, Долгое – к олиго-мезотрофным [Трифоновна, 1990]. По данным исследования 2017–2018 гг., исходя из средних величин биомассы и хлорофилла-*a*, трофический статус Дудергофского озера можно оценить как мезоолиготрофный, Долгое озера – как олиготрофный, Безымянного – как мезотрофный по фитопланктону. По концентрации раститель-

ных пигментов все рассмотренные водоемы являются мезотрофными [Трифонов, 1990]. Исходя из приведенных выше расчетов интегральной первичной продукции, оценка трофического статуса по показателям средней биомассы, сделанная для двух первых озер – водоемов «детритного» типа, является слишком заниженной и потому недостоверной. В результате комплексного антропогенного воздействия в водоемы Дудергофской системы поступают значительные количества биогенных элементов, в первую очередь с бытовыми стоками. Но при этом возрастание по сравнению с 1990-ми гг. концентраций азота и фосфора в Безымянном озере и оптимальное для развития сине-зеленых соотношение N/P, тем не менее, не влияют на продуктивность фитопланктона. Устойчивость и стабильность планктонных альгоценозов Дудергофских озер определяются повышенной минерализацией и значительным развитием высшей водной растительности – основного конкурента планктонных водорослей, а также протозойного и зоопланктона (оз. Безымянное), о чем свидетельствуют значительные расхождения между биомассой фитопланктона и содержанием растительных пигментов.

Поскольку именно поступление фосфора определяет скорость эвтрофирования озер и ухудшение их экологического состояния, была выполнена количественная оценка современного уровня фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер [Внешняя и внутренняя фосфорная..., 2019]. Как известно, фосфорная нагрузка на водоем представляет собой сумму двух слагаемых – внешней нагрузки, формирующейся на водосборе, и внутренней нагрузки, формирующейся в самом водоеме. По результатам математического моделирования в сочетании со спутниковой съемкой водосбора получено, что в условиях средней водности на поверхность водосбора Дудергофских озер поступает 2,621 т Р/год. Водосбором и его гидрографической сетью удерживается 1,627 т Р/год, нагрузка на акваторию озер с водосбора составляет 0,994 т Р/год, фоновая или природная нагрузка – 0,507 т Р/год. Сельскохозяйственные предприятия, расположенные на водосборе оз. Дудергофского – птицефабрика «Русско-Высоцкое» и ЗАО «Красносельский», не оказывают существенного влияния на формирование нагрузки на озеро. В результате, внешняя фосфорная нагрузка на озеро системы пропорциональна их водосборным площадям. Однако, нагрузка на единицу площади Дудергофского озера, характеризующегося наибольшим удельным водосбором, пятикратно превышает таковую для озер Долгого и Безымянного (соответственно, 1,333 и 0,264 г/(м² год)).

Современный уровень внутренней фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер ориентировочно оценивается в 0,168 т Р/год, что составляет 14,5 % суммарной фосфорной нагрузки на систему озер. Приведенные цифры свидетельствуют об определяющем влиянии внешней фосфорной нагрузки на экологическое состояние изучаемых водных объектов, что закономерно, учитывая невысокий трофический статус озер. На долю Дудергофского озера приходится 83 % суммарной внутренней фосфорной нагрузки на систему озер. Плотность потока фосфора со дна Дудергофского озера в 2 раза выше осредненного значения для двух других озер системы, при этом удерживающая способность его донных отложений по отношению к фосфору в 2,2 раза ниже.

Выполненная оценка фосфорной нагрузки, представляющей собой сумму внешней и внутренней нагрузок, на Дудергофское озеро составляет 1,530 г/(м² год), на озера Долгое и Безымянное – 0,364 г/(м² год), т.е. в 4,2 ниже. Полученная информация может служить объяснением того, что Дудергофское озеро характеризуется наихудшими показателями качества воды из числа трех озер рассматриваемой системы.

Комплексные лимнологические исследования на *водохранилище Сестрорецкий Разлив* проводились Институтом озераведения в 1980–1981, 2002, 2015–2016 и 2018–2019 гг. В основном работы выполнялись на договорной основе по заказу административных органов Ленинграда, а впоследствии Санкт-Петербурга. Сестрорецкий Разлив образован в 1723 г. для нужд Сестрорецкого оружейного завода в результате сооружения плотины на р. Сестре в 5 км выше места ее впадения в Финский залив [Сохранение природной экосистемы..., 1984]. Площадь зеркала составляет 10,3 км², объем водной массы – 19 млн м³. Средняя глубина водоема 2,2 м, что определяет отсутствие термической стратификации в течение всего года. В водоем впадают два основных притока – реки Сестра и Черная. Условный водообмен – около 10. Площадь водосборного бассейна Сестрорецкого Разлива составляет 566 км².

Необходимость мониторинга состояния водохранилища обусловлена тем, что с 1966 г., после введения в строй Сестрорецкой водопроводной станции, оно являлось источником питьевого водоснабжения г. Сестрорецка. Кроме того, расположение водохранилища в курортной зоне Санкт-

Петербурга на городской территории предусматривает специальный режим его эксплуатации в соответствии с действующими санитарными правилами и нормами. В то же время Сестрорецкий Разлив подвержен постоянному комплексному антропогенному воздействию со стороны урбанизированного ландшафта. На прилегающих к водоему территориях расположены сельскохозяйственные угодья, автодороги, ведется интенсивное строительство жилых массивов.

В 1980–1981 гг. ИНОЗ РАН проводил регулярные комплексные исследования Сестрорецкого Разлива, когда встал вопрос об оздоровлении водоема путем выполнения дноочистки. Работы проводились под руководством к.х.н. Е.А. Стравинской. В результате исследований был описан гидрохимический режим, определены качественные и количественные характеристики фитопланктона, оценены уровень биопродуктивности, ряд микробиологических показателей и степень зарастания водоема, исследовано его заиление. В начале 1980-х гг. макрофиты занимали 14,8 % площади дна, что позволяло отнести водоем к умеренно зарастающим. По уровню продуктивности фитопланктона Сестрорецкий Разлив был мезотрофным водоемом. В фитопланктоне было обнаружено 187 таксонов водорослей, доминировали зеленые и диатомовые, сине-зеленые составляли не более 10 %. Максимальная биомасса отмечалась в мае в период весеннего пика. Содержание хлорофилла изменялось от 1 до 30 мкг/л при среднем значении за сезон 14 мкг/л. Однако оценки, выполненные на основе гидрохимических исследований, показали, что биогенная нагрузка избыточна, на основе чего был дан прогноз неизбежного интенсивного эвтрофирования водоема. Установлено, что основными источниками загрязнения водохранилища являются его притоки – реки Сестра и, особенно, Черная, водосбор которой подвержен большему антропогенному влиянию. Благодаря значительной проточности и интенсивным процессам самоочищения экосистема Сестрорецкого Разлива справлялась с нагрузкой и экологическое состояние водоема в целом оставалось удовлетворительными. Результаты исследований 1980-х гг. изложены в монографии [Сохранение природной экосистемы..., 1984].

На следующем этапе комплексных исследований водохранилища было установлено, что за прошедшие 20 лет годовая фосфорная нагрузка на водоем увеличилась в два раза (с 2,2 до 4,5 г/м²), причем, доля минерального фосфора в общем его поступлении возросла с 8–10 до 14–26 % [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002]. Отмечено увеличение видового разнообразия фитопланктона до 268 таксонов, в том числе числа видов цианобактерий [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002; Трифонова, Павлова, 2005]. Величина биомассы фитопланктона возросла в 6 раз. Концентрация хлорофилла-*a* составляла от 4 до 175 мкг/л. При этом цианобактерии практически полностью вытеснили другие группы водорослей. Диатомовые доминировали только в весеннем планктоне в мае, в дальнейшем их роль не превышала 3–10 %. В течение вегетационного периода отмечалось постоянное «цветение» воды. Основным доминантом планктона была *Planktothrix agardhii*. Преобладание этого вида считается показателем высокой степени эвтрофирования и органического загрязнения [Трифонова, 1990], что явилось результатом резкого увеличения антропогенной нагрузки на водоем в 1990-е гг., прежде всего, за счет количества поступающих бытовых стоков. В целом, по сравнению с началом 1980-х гг., уровень фитопланктона возрос почти на порядок. Средние показатели биомассы фитопланктона и содержания хлорофилла в 2002 г. характеризовали Сестрорецкий Разлив как гипертрофный водоем [Водные объекты Санкт-Петербурга; Трифонова, Павлова, 2005].

Задачей исследований, выполненных в 2015–2016 и 2018 гг., было оценить современное экологическое состояние Сестрорецкого Разлива, выявить сезонную и отчасти межгодовую изменчивость основных показателей и тенденции их изменения, начиная с 80-х гг. прошлого века. Результаты исследования показали, что, как и ранее, основными факторами, определяющими гидрохимический режим Сестрорецкого Разлива, являются высокая проточность и мелководность. Водоем имеет низкоминерализованную воду, однако отмечена тенденция роста содержания главных ионов: если в 1980–1981 гг. оно составляло 37–121 мг/л, то современные значения лежат в диапазоне 46–148 мг/л. За последние четыре десятилетия соотношение главных ионов также изменилось. Известно, что для поверхностных вод Северо-Запада России характерно распространение гидрокарбонатно-кальциевых вод, а обогащение вод хлоридами и ионами натрия в основном является следствием их загрязнения хозяйственно-бытовыми стоками. В начале 1980-х гг. основной ионный состав воды водохранилища был неустойчивым, в начале 2000-х гг., согласно классификации О.А. Алекина [Алекин, 1970], водоем принадлежал к сульфатному классу группы натрия и был обогащен хлоридами. На современном этапе воды Сестрорецкого Разлива можно достоверно классифицировать как хло-

ридно-натриевые. Вероятно, определенный вклад в возросшие концентрации ионов Na^+ и Cl^- вносит усилившееся в последнее время поступление подземных вод, обогащенных этими ионами.

Еще в начале 1980-х гг. была выявлена четкая зависимость между содержанием общего фосфора в поверхностном притоке и в воде водоема [Сохранение природной экосистемы..., 1984]. В начале 1980-х гг. содержание общего фосфора варьировало в пределах 0,032–0,355 мг Р/л (при среднем значении 0,073 мг Р/л), в 2015–2018 гг. значения $P_{\text{общ}}$ были практически в том же интервале 0,038–0,314 мг Р/л, однако среднее значение $P_{\text{общ}}$ повысилось до 0,103 мг Р/л, что явилось результатом дальнейшего роста фосфорной нагрузки на водоем, как внешней, так и внутренней [Экологическое состояние водохранилища..., 2017]. Современный этап характеризуется наиболее широким диапазоном концентраций общего фосфора в период открытой воды, при этом, по сравнению с началом 1980-х гг., максимальная концентрация $P_{\text{общ}}$ возросла практически вдвое.

Выявлено существенное изменение в соотношении N/P, являющемся важным показателем условий развития планктонных сообществ, по сравнению с началом 1980-х гг., когда оно в среднем составляло 16 (при оптимальном значении, равном 7), т.е. развитие фитопланктона постоянно лимитировалось содержанием фосфора. По данным 2015–2016 гг. в период открытой воды весовое отношение N/P составляет в среднем по акватории от 3 до 8, и только в подледный период повышается до 26, т.е. можно утверждать, что на современном этапе развитие летнего фитопланктона лимитируется преимущественно содержанием азота.

Установлено, что в целом, в силу мелководности и высокой проточности, химический состав воды Сестрорецкого Разлива, главным образом, количественные соотношения химических компонентов являются неустойчивыми, достаточно быстро реагирующими на изменение гидрометеорологической обстановки на водосборной территории и в районе акватории водоема, что отражается на межгодовой изменчивости большинства гидрохимических показателей. Отмечено превышение нормативов для рыбохозяйственных водоемов по содержанию нефтепродуктов, фенолов и ряда тяжелых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn), хотя, как уже указывалось выше, высокие концентрации железа и марганца характерны для данной геохимической провинции. Баланс химических веществ в водохранилище, выполненный для периода с апреля по октябрь 2019 г., показывает, что, несмотря на более высокие концентрации главных ионов, биогенных элементов, органических веществ, в том числе фенолов и нефтепродуктов, а также металлов в водах р. Черной по сравнению с р. Сестрой, поступление этих веществ в Сестрорецкий Разлив с водами Сестры в 3–4 раза выше из-за большего объема водного стока.

В 2015–2018 гг. в планктоне водохранилища было обнаружено 247 таксонов рангом ниже рода (237 видов) водорослей, относящихся к 9 отделам, т.е. меньше, чем в начале 2000-х гг. [Rusanov, Trifonova, Ignatyeva, Pavlova, 2020]. Основу альгофлоры почти во все сезоны составляли зеленые, диатомовые, эвгленовые и цианобактерии (сине-зеленые). По средним за сезон показателям фитопланктона – биомассе (около 20 мг/л) и содержанию хлорофилла в планктоне (более 45 мкг/л) Сестрорецкий Разлив остается высокотрофным водоемом, но уровень развития водорослей несколько снизился [Трифонова, Павлова, Афанасьева, Станиславская, 2015]. В летнем планктоне, как правило, преобладали диатомовые водоросли, а развитие цианобактерий было существенно ниже, чем в начале 2000-х гг. В течение сезона доминирует преимущественно крупноклеточная *Aulacoseira granulata* var. *muzzanensis* (F.Meister) Sim., характерная для мелководных эвтрофных водоемов и приспособленная к условиям перемешивания и повышенной мутности. При массовом развитии этот вид является показателем эвтрофирования.

За период исследований 2015–2018 гг. биомасса фитопланктона водохранилища изменялась от 0,2 до 76,1 мг/л, составляя в среднем: в 2015 г. – 19,5, в 2016 г. – 16,2, в 2018 г. – 21 мг/л. Пределы колебаний биомассы в течение всех трех лет сопоставимы, но среднесезонные значения 2018 г. заметно выше предыдущих [Экологическое состояние водохранилища..., 2017; Трифонова, Павлова, Афанасьева, Станиславская, 2015]. Сделан прогноз о сохранении значительной роли видов рода *Aulacoseira* в формировании планктонных сообществ водохранилища, обусловленной высокой концентрацией общего железа в воде рр. Сестры и Черной. В целом, на основании данных о средних за период наблюдений биомассе фитопланктона и содержании хлорофилла-*a* в воде трофический статус водохранилища Сестрорецкий Разлив в настоящее время оценивается как высокоэвтрофный по обоим показателям. Установлено, что в целом водные массы остальной акватории водохрани-

лица, как правило, пригодны для любого вида водопользования, в том числе для рекреационного. Однако, в связи с мелководностью и относительно небольшим размером Сестрорецкого Разлива, при сильных ветрах различных направлений, в условиях интенсивной динамики водных масс, загрязненные воды притоков могут распространяться по всей акватории и достигать районов, достаточно удаленных от впадения рек Сестры и Черной.

Исследования высшей водной растительности водохранилища в 2015–2016 гг. показали, что его акватория зарастает крайне неравномерно. Сравнение современного распределения зарослей с данными 1980-х годов выявило, что по-прежнему основная часть зарослей макрофитов располагается вдоль западного берега озера и в северной части водоема вблизи дельты р. Сестры. Северный берег водоема практически лишен высшей водной растительности. В дельте р. Черной сосредоточен крупный массив плавающей растительности, образованный кубышкой желтой (*Nuphar lutea* (L.) Smith.) и рдестом плавающим (*Potamogeton natans* L.). Снижение площади зарастания, и, прежде всего, погруженной растительности, указывает на то, что эвтрофирование водоема идет по фитопланктонному пути [Alternative equilibria in..., 2015]. При этом увеличение биогенной нагрузки сопровождается подъемом биомассы фитопланктона, который угнетающе действует на развитие макрофитных сообществ. Высокая цветность и мутность воды в Сестрорецком Разливе – дополнительные факторы, ограничивающие развитие макрофитов и предотвращающие макрофитный путь эвтрофирования водоема. За прошедший период на участках водоема в дельтах рек Сестры и Черной произошло снижение флористического и ценотического разнообразия плавающей и погруженной растительности, свидетельствующее о сильном загрязнении их вод хозяйственно-бытовыми стоками.

Одной из основных экологических проблем Сестрорецкого Разлива является заиление, которое происходит в значительной степени за счет поступления наносов с водосбора со стоком рек Черной и Сестры. Исследования 1980–1981 гг. показали, что поступающие в водохранилище взвеси частично идут транзитом и сбрасываются в Водосливной канал, другая их часть оседает на дно и аккумулируется в донных отложениях [Сохранение природной экосистемы..., 1984]. В начале 1980-х гг. водоем удерживал 60 % поступающих в него взвесей. Работы 2002 г. выявили возрастание мутности притоков и степени удержания речных наносов (до 77,5 % внешнего поступления) [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002]. Результаты математического моделирования показали, что наиболее интенсивно осадконакопление происходит в устьевой части рек Сестры и Черной, а также на отдельных участках береговой зоны в северной и юго-восточной частях водоема.

В результате георадарного обследования участка дна Сестрорецкого Разлива, примыкающего к основной рекреационной зоне в районе пляжа г. Сестрорецка, выполненного сотрудниками ИНОЗ РАН осенью 2011 г., были определены толщина слоев различных типов донных отложений на исследованном участке дна и границы их распространения. Установлено, что верхний 10–30 см слой донных отложений представляет собой жидкий ил. Ниже расположен менее однородный илисто-торфянистый слой, мощность которого варьирует от 10 до 60 см. Глубже залегающие осадки представлены песками преимущественно среднефракционного состава и суглинками. По данным георадарных работ определена граница, разделяющая пески и суглинки, которая проходит с северо-запада на юго-восток данного участка, при этом пески полностью занимают его южную часть. На значительной площади исследованного участка дна тонкий слой жидкого ила лежит непосредственно на песчаном осадке. Таким образом, установлено, что мощность собственно озерных донных отложений, накопившихся за 300 лет существования водоема, невелика.

Значимость донных отложений в качестве источника вторичного поступления химических веществ в водную массу водохранилища была оценена для фосфора. В результате использования методов математического моделирования в сочетании со спутниковой съемкой водосбора и данных натурных наблюдений оценена внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на Сестрорецкий Разлив. Значение современной внешней фосфорной нагрузки на водоем для года средней водности оценивается в 11,0 т Р/год. Установлено, что поток фосфора из донных отложений вносит существенный вклад в формирование фосфорного запаса в водной массе водоема. Современная внутренняя фосфорная нагрузка ориентировочно оценивается в 3,2 т Р/год, что составляет почти 30 % от внешней нагрузки или 23 % суммарной нагрузки на водоем [Кондратьев, Игнатъева, Каретников, 2016].

Таким образом, помимо вклада в развитие теоретических основ лимнологии, результаты многолетних натурных и модельных исследований по изучению особенностей и закономерностей функци-

онирования водных экосистем в урбанизированных ландшафтах уже на протяжении нескольких десятилетий находят своё практическое применение. Сотрудниками ИНОЗ РАН разработан комплекс мероприятий по улучшению экологического состояния городских водоемов, включающий мероприятия как на самом водоеме, так и на его водосборе, а также по оценке эффективности выполняемых оздоровительных мероприятий. При этом для осуществления постоянного контроля экологического состояния водных объектов и получения массива данных, необходимого для его корректной оценки, рекомендована организация следующих основных видов мониторинга: гидрологического, гидрохимического, гидробиологического, токсикологического, а также мониторинга берегов.

6.4. Опыт изучения и практического использования сапропеля

Сапропель – это продукт донных отложений пресноводных водоемов, образующийся в результате постмортальных превращений озерных гидробионтов и трансформации почвогрунтовых частиц при ограниченном доступе кислорода. Органическое вещество сапропеля является совокупностью деструкции флоры и фауны, подвергающихся разложению под слоем воды. Составляющие сапропеля находятся в сложном взаимодействии друг с другом. Сапропель нельзя считать результатом простого накопления на дне озера разложившихся остатков живых существ и растений, чтобы стать сапропелем, они проходят различные стадии трансформаций. С этой точки зрения, озеро представляет собой природную лабораторию, в которой происходят сложнейшие биологические процессы. Условия образования сапропеля на дне озера очень мягкие: невысокая положительная температура, слабый доступ света, минимальное воздействие кислорода. В результате реакции распада и синтеза сформировался однородный, богатый питательными и биологическими активными веществами природный материал, благотворно влияющий на развитие живых организмов. В состав сапропеля в сбалансированном отношении входят органические и минеральные вещества, а также полезные почвенные микроорганизмы.

В 1916 г. Академическая комиссия по изучению естественных производительных сил России (КЕПС) по заданию Особого совещания по обороне государства при военном министре Российской империи приступила к всестороннему изучению образцов сапропелита озера Балхаш, а также битумов и сапропелей других озер. Это стало началом комплексного изучения сапропеля в России. И уже через 3 года по инициативе академиков Николая Семеновича Курнакова и Владимира Ивановича Вернадского был создан Сапропелевый комитет при КЕПС. Задачами Комитета являлось исследование природы и состава ископаемых сапропелей «сапропелитов», разработка научных программ для их изучения, разрешение ряда специальных научно-технических и теоретических вопросов исследования сапропеля и родственных ему веществ. К концу 1930-х годов работы по сапропелю практически были свернуты, в связи с начавшимися репрессиями на ведущих специалистов в этой области (все руководство Института сапропеля) и началом Отечественной войны.

Сейчас с развитием сельского хозяйства в стране вновь возродился интерес к исследованию и практическому применению сапропеля. Сапропели являются полезным органическим сырьем для различных отраслей экономики. В настоящее время существуют технологии, позволяющие эффективно использовать сами сапропели, а также их производные. Закономерно, что сапропели стали объектом научного интереса.

Химический состав сапропеля состоит из органической и минеральных частей. Его органическая часть имеет достаточно сложный состав: белки, аминокислоты, витамины и пигменты. Аминокислотный состав зависит от месторождения сапропеля и глубины отбора проб. По витаминному составу в сапропеле были обнаружены: тиамин, рибофлавин, фолиевая кислота, пиридоксин, аскорбиновая кислота в редуцированной форме [Елисеев, Багута, Белова, Степанов, 2011]. Минеральная часть сапропеля содержит соединения: марганца, меди, серы, бора, кальция, цинка, ванадия, железа, висмута, кобальта, молибдена, йода, фосфора, для некоторых месторождений выделяют также бериллий, кадмий, хром и никель. На химический состав сапропелей сильно влияют условия их формирования, а также разнообразие растительного и животного мира озера [Штин, 2005; Косов, 2007].

В донных отложениях с месторождений сапропелей обнаруживают азотофиксирующие бактерии, микобактерии, бактерии масляно-кислого брожения, железо-бактерии, клетчатко-разрушающий

аэробы и анаэробы. Подобный бактериальный состав говорит об активном протекании процессов аммонификации и денитрификации [Микроорганизмы донных осадков..., 2018]. По данным анализа материалов разведки торфяных месторождений на территории России зарегистрировано 648 торфяных месторождений с наличием сапропеля. Общая площадь, занятая в них отложениями сапропеля, составляет 11 931 га с запасом сапропеля в 1 179 225 тыс. м³. Запасы сапропелевых отложений под торфяной залежью учтены по территории России в 43 регионах. Поскольку при учете сапропелевых отложений под торфяной залежью использованы только материалы изысканий торфяных месторождений, то степень изученности запасов сапропелей в торфяниках полностью отвечает степени изученности торфяного фонда той или иной области. Для центральных областей европейской части России эта изученность составляет от 62 до 97 % от предлагаемого фонда. Для северных областей и Сибири изученность резко падает и по отдельным областям не превышает 5 % от предлагаемого фонда. С количественной стороны детальной разведкой охвачено около 80 % всего запаса сапропелевых отложений, т. е. на 1–2 га сапропелевой толщи приходится одна зондировочная точка. Как уже отмечалось, качественная характеристика сапропелевых отложений, как правило, отсутствует совершенно [Штин, 2005; Косов, 2007]

В ИНОЗ РАН работы по изучению свойств сапропеля были начаты сравнительно недавно [Инновационная технология переработки..., 2016; Румянцев, Митюков, Крюков, Ярошевич, 2017]. С помощью ультразвуковой обработки сапропеля были впервые получены ультрадисперсные гумато-сапропелевые суспензии с частицами размерами 86–89 нм. Было установлено, что полученные суспензии эффективно дезактивируют распространенные в окружающей среде экотоксиканты ряда тяжелых металлов и при включении в рацион питания сельскохозяйственных животных приводят к значительному среднесуточному приросту живой массы. Правомерно предположить, что ультрадисперсные гумато-сапропелевые суспензии (УДГСС), содержащие наночастицы с высокоразвитой поверхностью и наличием химически активных функциональных групп, должны обладать высокими сорбционными свойствами не только по отношению к неорганическим веществам, но и к субстанциям биологической природы типа вирусов и патогенных микроорганизмов. Это послужило основанием для настоящего исследования по изучению влияния ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на урожайность пшеницы. Было зафиксировано, что использование в качестве удобрения ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии стабилизированной водой в отношении концентраций 1 к 100 обеспечило существенный прирост зеленой массы яровой и озимой пшеницы.

Применение сапропеля в растениеводстве. Данные исследований ИНОЗ подтверждают, что ультрадисперсная гумато-сапропелевая суспензия значительно активизирует физиологические процессы, протекающие в растениях. Во всех вариантах использования препарата наблюдается повышение урожайности по сравнению с контрольными посевами. При использовании 45 литров препарата на 1 га урожайность повышается на 9,0 %. Наилучший результат получен при норме внесения препарата 90 литров на 1 га и составляет 20,4 % (табл. 6.1) [Митюков, Гузева, Нсенгумуремый, 2018; Нсенгумуремый, Баракова, Митюков, 2019].

Табл. 6.1. Влияние УДГСС на урожай пшеницы «Московская 39»

Варианты	Урожайность, кг/га	%
180 л на га	2721,43±152,76	119,3
90 л на га	2747,29±156,16	120,4
45 л на га	2486,59±229,95	109,0
контроль	2281,19±180,00	100

Наиболее показательные результаты положительного влияния УДГСС наблюдаются на делянках с наименьшей плотностью посева. Явно прослеживается прямая зависимость от количества УДГСС. Более того, при внесении 50 мл экстракта на делянку с наименьшей плотностью посева, наблюдается наилучший показатель по количеству растений [Митюков, Гузева, Нсенгумуремый, 2018;

Румянцев, Митюков, Крюков, Ярошевич, 2017]. На количество растений на более плотно засеянной делянке (4 млн семян) УДГСС уже не оказывает такого заметного влияния, как при норме высева 3 млн нормы высева. А на делянке с наибольшей плотностью посева (5 млн семян) зависимость не видна, нет достоверной разницы с контролем (рис. 6.17).

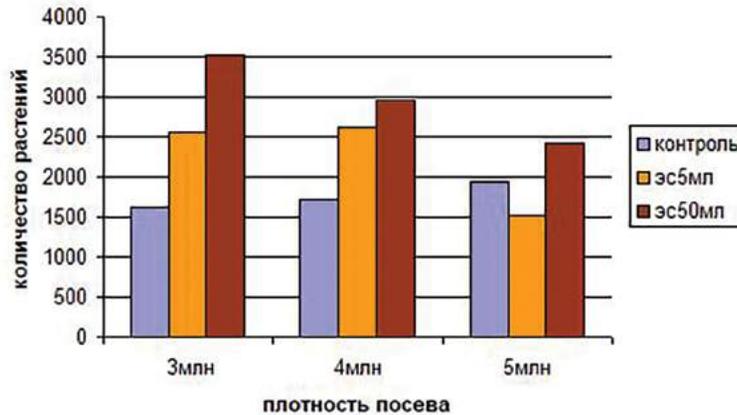


Рис. 6.17. Влияние УДГСС на количество растений при различной плотности посева

Изучено влияние УДГСС на сроки и качество зерна при его хранении. Результаты, полученные в ходе проведенных экспериментов, позволяют говорить о новом способе обработки зерна. Это является ключевым фактором для обеспечения безопасности сырья и продуктов питания, приготовленных на их основе. Также новый способ обработки зерна позволит расширить область применения сапропелей и ультрадисперсных гумато-сапропелевых суспензий, полученных на их основе. УДГСС влияет на активность бактериальной α -амилазы. По всей видимости, это обусловлено окислительно-восстановительной способностью, содержащихся в суспензии гуминовых кислот, влияющие на конформацию молекул фермента. Гуминовые кислоты, в свою очередь, по-разному взаимодействуют с активными центрами фермента при различном рН. Вероятно, УДГСС с кислой реакцией действует на α -амилазу гораздо сильнее, чем с нейтральной или щелочной.

В зерне и зерновых продуктах при влажности ниже 13,5 % не происходит развитие плесени, и изменения идут за счет гидролитических процессов. Эти процессы в первую очередь затрагивают липидную фракцию зерна, и в значительной мере определяются активностью липазы. Обработка УДГСС повышает активность липазы, так как она ингибируется гуминовыми веществами [Нсенгумуремый, Баракова, Митюков, 2019].

Обработка УДГСС привела к снижению кислотного числа жира в сухой барде. Показатели снизились на 33 %, что обусловлено ингибирующим эффектом гумато-сапропелевых суспензий на липазный комплекс ферментов. В результате обработки сухой послеспиртовой барды, полученной суспензией, позволила повысить количество водорастворимого белка. Содержание водорастворимого белка на 23 %. В процессе хранения послеспиртовой барды происходит изменение водорастворимой фракции белка. В течение 6 месяцев количество водорастворимого белка в контрольном образце снизилось на 30 %, а в обработанном – на 24 %. Обработка УДГСС позволила стабилизировать фракционный состав белка в процессе хранения. Это связано с тем, что гуминовые кислоты, содержащиеся в суспензиях, способны к инкапсуляции белков и влияют на его активность [Нсенгумуремый, Баракова, Митюков, 2019].

Массовая доля влаги в период исследования в обработанном образце повысилась на 27 %, в необработанном на – 38 %. В обоих случаях содержание влаги соответствует стандартному показателю для сухой барды [Шарова, Митюков, Баракова, Нсенгумуремый, 2019].

В результате исследований было изучено влияние ультрадисперсных гумато-сапропелевых суспензий, выделенных из озерного сапропеля, на барду. Добавление УДГСС уменьшает количество микроорганизмов в сырой послеспиртовой барде, их концентрация меньше контрольного образца в 1,98 раз во вторые сутки хранения. В последующие сутки количество микроорганизмов особо

не различается, возможно, поэтому для уменьшения количества микрофлоры следует вносить УДГСС не только в начале обработки, но и в течение последующего хранения [Нсенгумуремый, Баракова, Митюков, 2019; Шарова, Митюков, Баракова, Нсенгумуремый, 2019].

В области фармакогнозии, при экологическом выращивании шпината и базилика на бедных почвах, в отсутствие химических удобрений, и для последующей переработки его на лекарственное сырье. Исследование стимулирующего действия гуминовых кислот нужно акцентировать на обогащении растений данными по микроэлементам и рекомендуется еще учитывать накопление в зеленой биомассе ионов меди. Улучшение усвоения элементов питания для шпината и базилика было показано при аэропном способе беспочвенного выращивания, в условиях многоярусной фитофермы [Использование шпината..., 2022].

Применение сапропеля в животноводстве. Опытной группе крупного рогатого скота (КРС) (тёлки) ($n = 10$) добавляли в ежедневный рацион кормления по 200 г натурального сапропеля на каждого животного. Эксперимент длился 253 дня с момента постановки телок на зимний стойловый период. Исследованиями установлено, что от введения в рацион сапропеля животные дополнительно получали в день: 111,5 г сухого вещества, 7,7 г сырого протеина, 0,44 г кальция, 8,3 мг меди, 73,1 мг цинка, 3,8 мг кобальта и 23,7 мг марганца. Эффективность от введения в рацион сапропеля составила 38,2 г и среднесуточный прирост опытной группы с сапропелем составил 764 г. Превышение в среднесуточном привесе телок, получавших сапропель, от контроля составил 5,26 %.

Исследования показали высокий положительный эффект действия экстрактов сапропеля при разных вариантах использования. Эффект действия УДГСС получен на высоком фоне проводимого эксперимента на уровне 800–1000 г среднесуточного прироста. Установлено, что высокие приросты живой массы получены при использовании в качестве кормовой добавки УДГСС. Первая опытная группа, получавшая УДГСС, дала прирост живой массы за весь период эксперимента на 18,1 % (146 г) больше, чем контрольная группа. Вторая опытная группа телок, которая только один месяц получала суспензию, также дала среднесуточный прирост +97 г, или +12 % к контролю. Результаты показывают, что ультрадисперсная гумато-сапропелевая суспензия оказывает значительную положительную роль в развитии животных (табл. 6.2). Даже одномесячная дача суспензии оказывает долгосрочное положительное влияние на организм животных. Дальнейшие исследования должны подтвердить, как долго, в какие возрастные периоды и как часто необходимо будет использовать ультрадисперсную гумато-сапропелевую суспензию для тёлки [Митюков, Ярошевич, 2018].

Табл. 6.2. Среднесуточные приросты живой массы телок при использовании кормовой добавки УДГСС

Опытные группы	Среднесуточный прирост живой массы, г		
	По группе	± к контролю	%
Контроль	806±120,2	–	100
Первая опытная группа	952±129,0	+146 г	118,1
Вторая опытная группа	903±87,0	+97 г	112,0

Проведены исследования по влиянию ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на продуктивность телок. Установлено, что за 212 суток проведения эксперимента каждая телка в опытной группе дала прирост живой массы в среднем на 18,1 % (146 г) больше, чем в контрольной группе. Эксперимент проводился на телках 6-ти месячного возраста черно-пестрой породы, в зимний период, начиная с 15 октября по 15 мая. Контрольная и опытная группы телок состояли из десяти голов каждая. Контрольная группа получала основной рацион, рассчитанный по нормам для нормального роста и развития телок данной возрастной группы, а телкам опытной группы к основному рациону добавляли по 20 мл ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на каждую голову. За время проведения эксперимента у телок трижды провели забор крови: до начала эксперимента, после трех и шести месяцев от начала эксперимента. Перед началом и по окончании эксперимента проводи-

лось взвешивание телок. Влияние ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на физиологическое состояние телок оценивали по следующим биохимическим показателям крови животных: содержанию белка сыворотки крови, γ -глобулина, бактерицидной и лизоцимной активности сыворотки крови, содержанию ферментов АлАТ и АсАТ, щелочной фосфатазе и билирубин. Результаты проведенного эксперимента показывают, что ультрадисперсная гумато-сапропелевая суспензия оказывает значительную положительную роль в развитии животных [Митюков, Баракова, Рыбакин, Токбаева, 2020].

Полученные данные свидетельствуют о безусловном положительном эффекте применения гуминовых веществ сапропеля в качестве натуральных пищевых биологически активных добавок. Заметим, что даже небольшой прирост живой массы крупного рогатого скота в масштабах фермы, региона и страны в целом имеет важное практическое значение. При взаимодействии экотоксикантов с гуминовыми веществами сапропеля с повышенным содержанием наночастиц происходит агрегация и последующее элиминирование ядовитых субстанций, возникают благоприятные условия для жизнедеятельности и повышения продуктивности сельскохозяйственных животных.

Удаление микотоксинов из растительного сырья – одно из перспективных направлений использования сапропеля. Микотоксины представляют собой группу метаболитов, обладающих токсичным действием. Под влиянием факторов окружающей среды разновидности микотоксинов постоянно увеличиваются. Из растительного сырья микотоксины переходят в организм млекопитающих и накапливаются в нем. Борьба с микотоксинами ведется в двух направлениях. Одно из них включает в себя стандартные физические, биологические и химические методы, направленные на повышение устойчивости растений к патогенам и удаление микотоксинов или подавление их роста. Второе направление – добавление в питательный рацион препаратов сорбционного действия, которые нейтрализуют негативное влияние микотоксинов на организм в процессе пищеварения. Препараты сорбционного действия должны обладать селективностью действия к микотоксинам, стабильностью при различных значениях pH и термоустойчивостью, а также, в меньшей степени, связывать витамины и микро- и макроэлементы. В эти препараты входят естественные или технические адсорбенты. Сорбционными свойствами обладают и гуминовые вещества. Наличие в их составе карбоксильной, гидроксильной и карбонильной групп в комплексе с ароматическими структурами способствует активному участию в сорбционных процессах. Обозначенные факторы позволяют гуминовым веществам и препаратам, полученным на их основе, выступать в качестве природных детоксицирующих веществ. Перспективным препаратом в борьбе с микотоксинами является УДГСС, содержащая гуминовые вещества и полученная методом щелочной экстракции из сапропеля под действием ультразвукового излучения. Опыты, проведенные с применением этой суспензии на зернах ячменя и после-спиртовой барде, доказали снижение концентрации грибов и бактерий на исследуемых образцах, что свидетельствует о фунгицидных и бактерицидных свойствах препарата. Дальнейшие исследования необходимо направить на установление адсорбирующей роли ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии и выявление их способности к детоксикации различных микотоксинов без связывания полезных минерально-витаминных комплексов. Положительные результаты исследования являются основой для создания препарата, который будет решать задачу детоксикации микотоксинов в обоих обозначенных направлениях.

Перспективным препаратом в борьбе с микотоксинами является УДГСС, содержащая гуминовые вещества. Установлено, что данная суспензия эффективно дезактивирует экотоксиканты различных тяжелых металлов и при использовании в рационе питания крупнорогатого скота приводит к увеличению среднесуточного прироста живой массы. Первая опытная группа, получавшая УДГСС, дала прирост живой массы за весь период эксперимента на 18,1 % (146 г) больше, чем контрольная группа.

Сапропели обладают бактерицидными свойствами. По ценности и разнообразию действия выделяются гуминовые вещества. Бактерицидное действие гуматов и гуминовых веществ основано на действии, входящих в состав гуминовых кислот, биологически активных групп. Обнаружена способность выделенных УДГСС ингибировать рост микроорганизмов на зернах ячменя и сухой ячменной после-спиртовой барды. В процессе обработки ячменя ультрадисперсными суспензиями уменьшается количество КОЕ примерно в 30 раз по сравнению с необработанным сырьем. При

дальнейшем хранении количество микроорганизмов не увеличивается. Помимо микробиологического ингибирования УДГСС активизируют рост и повышают урожайность озимой и яровой пшеницы. При внесении в почву 90 л/га структурированного сапропеля зафиксирована наиболее статистически значимая разница с контролем, увеличивается высота растений и количество колосьев на деланку.

Дальнейшие исследования свойств и методов использования сапропеля необходимо направить на установление адсорбирующей роли УДГСС и выявление ее способности к детоксикации различных микотоксинов без связывания полезных минерально-витаминных комплексов. Положительные результаты исследования могут послужить основой для создания препарата, который будет решать задачу детоксикации микотоксинов в обоих обозначенных направлениях [Митюков, Токбаева, Баранова, Нсенгумуремый, 2020].

Озерная микология. Проведены исследования влияния гуматов на озерный планктон Ладожского озера. Состав водных грибов был представлен: *Chytridiomycetes*, *Oomycetes*, *Zigomycetes*, *Deuteromycetes*. Численность водных грибов составляла 1000 диаспор в литре. В основном, все виды реагировали на присутствие гуминовых веществ увеличением скорости роста. При добавлении в среду фульвокислот (ФК) сохранилась та же тенденция, которая наблюдалась в эксперименте со штаммом *Rodotorula rubra*, то есть, угнетение при объемах 3 и 4 мл и увеличении роста при объеме 5 мл по сравнению с контролем. При этом, следует выделить реакцию темноокрашенного вида *Alternaria alternata* (Fr) Keissl. Рост этой колонии под влиянием гуминовых веществ затормаживался. Наиболее отчетливо это видно на среде с разведением 1 : 50 гуминовые вещества (ГВ), добавляемого в объеме 5 мл. Значения радиуса колоний *Alternaria alternata* были на 10,2±3,0 % ниже, чем в контроле. При снижении концентрации ГВ 1 : 100 рост этой темной пигментированной культуры замедляется на 5,4±1,2 %. Другие темноокрашенные культуры (*Cladosporium cladosporioides*, *Cladosporium sphaerospermum*) показали меньшую чувствительность к применению гуминового препарата.

Таким образом, удалось показать, что гуминовые вещества сапропеля по-разному влияют на физиологические характеристики исследуемых штаммов грибов. Присутствие гуминового вещества снижало кинетические показатели темноокрашенных штаммов *A. Alternata*. Можно предположить, что присутствие гуминового вещества может влиять на экологические функции микроскопических грибов [Митюков, Иофина, Рыбакин, 2020].

Использование фульвоной кислоты. Одним из биологически активных веществ является гумус – часть почвы или водного осадка, где содержатся основные минеральные и органические элементы. В процессе сложного синтеза и очистки выделены фульвовые кислоты, которые с успехом внедряются в медицинскую практику. Важнейшее их достоинство – воздействие на организм человека на генно-клеточном уровне, что позволяет эффективно бороться с неизлечимыми заболеваниями и патологическими состояниями. Современная наука предусматривает применение фульвоной кислоты в качестве экспериментального средства для усиления активности существующих лекарственных препаратов. Однако, в ближайшем будущем биологическое вещество, полученное из гумуса, вероятно, будет играть решающее значение для терапии тяжелых недугов.

Методом химического осаждения с последующей фильтрацией получены растворы фульвокислот из сапропелей. В серии лабораторных и вегетационных экспериментов изучено в регулируемых условиях интенсивной светокультуры влияние фульвокислот на растения кресс-салата и листового салата при следующих способах обработки: замачивание семян, некорневое опрыскивание вегетирующих растений, введение в корнеобитаемую среду – питательный раствор при гидропонном выращивании растений методом NFT (Техника тонкослойного питательного слоя (*Nutrient Film Technique*)). Установлено, что растворы фульвокислоты в концентрациях 0,3–150,0 мг/л, после обработки ими семян кресс-салата, оказывали наиболее выраженное стимулирующее влияние на биометрические показатели роста и развития корневой системы. При концентрации 30,0 мг/л не влияли на энергию прорастания и всхожесть семян. В период вегетативного роста при некорневой обработке растворами фульвокислот наибольший положительный эффект проявился при концентрациях 3,0 и 150,0 мг/л. Стимуляция роста растений салата под действием тестируемых веществ, пре-

имущественно, обусловлена усилением процессов обмена и поступлением необходимых растениям элементов питания в надземную часть и интенсификацией ассимиляционной активности листьев. Введение растворов фульвокислот в корнеобитаемую среду (питательный раствор) способствовало усилению корневого питания и активизации синтеза фотосинтетических пигментов – хлорофиллов и каротиноидов, стимулирующих процессы фотосинтеза. Максимальный положительный эффект установлен при концентрации фульвокислот 90,0 мг/л. Полученные данные свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения механизмов влияния фульвокислот на растения с целью создания эффективных биопрепаратов и технологии их применения в растениеводстве открытого и защищенного грунта, направленной на экологически дружественное повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и эффективности производственного процесса.

Проведены исследования по использованию фульвокислот в условиях фермы сельскохозяйственного кооператива «Имени Ильича» Новгородской области на молодняке крупного рогатого скота голштинской породы в возрасте 6–7 месяцев. Были сформированы три группы животных ($n = 10$) – контрольная, потребляющая основной рацион (ОР), первая опытная – ОР+5 мл фульвокислоты, вторая опытная – ОР+10 мл фульвокислоты. Установлено, что введение в рацион молодняка КРС 5 мл фульвокислоты положительно сказалось на переваримости всех изучаемых питательных веществ. Так, показатели переваримости сухого вещества, сырого протеина и сырой клетчатки в первой опытной группе превосходили аналогичные показатели контрольной группы на 1,9 %, 5,4 % и 5,8 %, соответственно. Коэффициенты переваримости сырого жира, безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ) и органического вещества у животных первой опытной группы также превосходили значения контроля – на 3,9 %, 2,4 % и 3,6 %. Повышение количества включенной фульвокислоты во второй опытной группе до 10 мл не привело к дальнейшему росту коэффициента переваримости, напротив, по отношению к первой опытной группе снизилась. Среднесуточный прирост в контрольной группе составил 700 г, в первой опытной – 887 г, и во второй опытной – 854. Эти данные показали, что увеличение дозировки кормовой добавки не целесообразно и приводит к снижению оплаты корма привесом. На основании анализа полученных данных были сделаны следующие выводы: использование фульвокислоты позволило повысить усвоение питательных веществ из рациона, увеличить продуктивность животных на опыте на 22,0–26,7 % [Лашкова, Петрова, Жукова, Митюков, 2022].

Применение сапропеля в пчеловодстве. В результате проведенных исследований по влиянию фульвокислоты на медопродуктивность пчелиных отводков в 2020 г. не установлено достоверной прибавки товарного меда. Так, в опытной группе получено по 6,5 кг меда в среднем на один отводок, что на 0,9 кг больше, чем в контрольной группе. Однако наименьшая существенная разница составила 1,4 кг товарного меда. При анализе данных 2021 г. было установлено достоверное влияние фульвокислоты на медовую продуктивность пчелиных отводков. Медопродуктивность отводков в опытной группе составила в среднем по 13,9 кг товарного меда, а в контрольной группе по 5,8 кг. Существенная разница составила 8,1 кг товарного меда при НСР = 3,0 кг. За два учетных года в среднем в опытном варианте было получено по 10,2 кг товарного меда на один пчелиный отводок, что на 4,5 кг больше, чем на контроле. По результатам исследований было установлено, что фульвокислота в дозе 0,2 мл/кг живой массы пчел положительно влияет на репродуктивную функцию пчелиных маток и способствует увеличению их яйценоскости на 22,5 %, а также способствует росту медовой продуктивности пчелиных отводков на 17,7 %. Фульвокислота может использоваться в пчеловодстве как стимулятор репродуктивной функции пчелиных маток и для увеличения медовой продуктивности пчелосемей [Влияние фульвокислоты на яйценоскость..., 2023].

Содержания тяжелых металлов в сапропеле. Хозяйственная деятельность человека приводит к тому, что природа страдает от поступления в почву, в реки и озера различных загрязняющих веществ, вредных для здоровья человека и животных. К этим веществам относятся, в том числе, тяжелые металлы, такие как ртуть, свинец, кадмий, цинк, мышьяк и их соединения, которые выделяются широкой распространенностью и высокой токсичностью. Они широко применяются в производстве, поэтому, несмотря на очистительные мероприятия, содержание этих тяжелых металлов в стоках бывает довольно высоким. В конечном итоге эти стоки попадают в реки, а затем в озера. Внутренние водоемы страны чаще всего являются накопителями тех вредных веществ, кото-

рые производит человек. В озерах эти тяжелые металлы, образуя различные соединения, оседают на дно и становятся составной частью сапропелей. Вот поэтому, прежде чем начать какие-либо работы по использованию сапропеля озера, необходимо провести исследования как минимум на содержание в них тяжелых металлов. Так как в исследованиях ИНОЗ РАН сапропель главным образом планировался к использованию в качестве кормовой добавки, было проведено сравнение содержания тяжелых металлов в сапропелях с временным максимально допустимым уровнем (МДУ) содержания некоторых химических элементов в кормах и кормовых добавках для сельскохозяйственных животных. Проведены исследования по качественному составу сапропелей по двум озерам в Псковской области и четырем в Новгородской. Определены средние показатели содержания тяжелых металлов в сапропеле по этим озерам. Исследования показали, что сапропели всех обследованных озер пригодны к разработке (табл. 6.3).

Табл. 6.3. Содержания тяжелых металлов в сапропеле исследованных озер

Наименование показателя	Содержания тяжелых металлов в сапропеле, мг/кг сухого вещества, не более			
	1-го класса пригодности		2-го класса пригодности	
	Норма (МДУ)	Факт	Норма (МДУ)	Факт
Кадмий	3	Менее 1,0	3–9	Менее 1,0
Цинк	30	5,6	300–600	5,6
Свинец	50	3,39	50–150	3,39
Медь	100	1,2	100–300	1,2
Ртуть	1,0	0,076	1,0–1,6	0,076
Марганец	500	542,5	500–1500	542,5
Никель	50		50–200	
Хром	100		100–260	
Кобальт	20	1,88	20–60	1,88
Молибден	20	3,0	20–200	3,0
Мышьяк	0,5–1,0	0,98	0,5–1,0	0,98

Таким образом, результаты исследований свойств сапропеля и способов его применения в сельском хозяйстве позволяют сделать следующие выводы:

- Сапропель и особенно его производные представляют исключительно высокую ценность для сельского хозяйства в качестве кормовой добавки (УДГСС) для сельскохозяйственных животных и в качестве микроудобрений в растениеводстве.
- Растворы фульвокислот, содержащихся в сапропеле, в малых концентрациях оказывают наиболее выраженное стимулирующее влияние на биометрические показатели роста и развития корневой системы растений.
- Фульвокислота положительно влияет на репродуктивную функцию пчелиных маток и способствует увеличению их яйценоскости на 22,5 %, а также увеличивает медовую продуктивность пчелиных отводков на 17,7 %. Фульвокислота может использоваться в пчеловодстве как стимулятор репродуктивной функции пчелиных маток и для увеличения медовой продуктивности пчелосемей.
- Дальнейшие исследования свойств и методов использования сапропеля необходимо направить на установление адсорбирующей роли УДГСС и выявление ее способности к детоксикации различных микотоксинов без связывания полезных минерально-витаминных комплексов. Положительные результаты исследования послужат основой для создания препарата, который будет решать задачу детоксикации микотоксинов.

За разработки современной технологии получения отдельных фракций сапропеля, их испытание в производственных условиях и внедрение в производство ИНОЗ РАН неоднократно награжден Дипломами и медалями Международной агропромышленной выставки-ярмарки «АГРОРУСЬ» (рис. 6.18).



Рис. 6.18. Свидетельства о награждении ИНОЗ РАН медалями выставки «АГРОРУСЬ» за работы по научному обоснованию использования сафлора и созданию методик его практического использования в сельскохозяйственном производстве

Глава 7

ИЗУЧЕНИЕ ОЗЕР АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Одним из первых примеров исследований ИНОЗ РАН озер арктической зоны явилась комплексная экспедиция 1986–1989 гг. по изучению влияния интенсивной нефтегазоразведки на природную среду и, в первую очередь, на озерный фонд в условиях Заполярья (Большеземельская тундра). Научный руководитель работ – д.б.н. Валентина Гавриловна Драбкова, начальник экспедиции – Л.Н. Варенцов. По условиям Научного договора с П/О «Архангельскгеология» целью проводимых работ было не только изучение особенностей экосистем тундровых озер, но и разработка рекомендаций по рациональному использованию и сохранению водоемов на территории геологоразведки. Благодаря помощи Нарьян-Марской НГРЭ, предоставлявшей вертолеты, помещения для жилья и лабораторий на буровых, удалось исследовать 20 озер на территории Хоседаюсского и Инзерейского районов, расположенных в центре Большеземельской тундры на водоразделе р. Колвы (рис. 7.1).

Для оценки изменений в озерах был использован сравнительно-лимнологический метод, сопоставлены природно-чистые и загрязненные озера разного типа. На четырех озерах проводили ежелекадные исследования в течение двух вегетационных периодов 1986 и 1987 гг. Исследования были начаты со льда в середине июня, продолжались после вскрытия озер (конец июня), в июле – августе и до конца сентября. Остальные озера обследовали эпизодически. Изучались гидрохимический режим, первичная продукция, структура и продуктивность биологических сообществ: макрофитов, фито-, бактерио- и зоопланктона, простейших, зообентоса.

Полученные данные позволили оценить антропогенные изменения тундровых озер на фоне их большого природного разнообразия. Площадь зеркала исследованных озер изменялась от 0,1 до 3,3 км², средняя глубина – от 0,8 до 6 м, максимальная – от 1,2 до 21 м. По химическому составу воды озера слабо минерализованные, все принадлежат к гидрокарбонатному классу группы кальция. В чистых незагрязненных озерах общая минерализация составляла 20–30 мг/л, рН воды близка к нейтральной – 6,4–7,6, содержание растворенного кислорода 70–90 % насыщения. Содержание общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) изменялось от 15 до 60 мкг/л, хлорофилла-*a* – от 0,3 до 20 мкг/л, интенсивность фотосинтеза фитопланктона – от 0,1 до 1,25 мгО₂/л в сутки.



Рис. 7.1. Комплексная экспедиция 1986–1989 гг. по изучению влияния нефтегазоразведки на озерный фонд Большеземельской тундры

Установлено, что в более зрелых глубоких озерах ледникового происхождения антропогенное воздействие (в первую очередь, за счет поступления буровых растворов) приводит к структурным и организационным перестройкам озерных экосистем. Уменьшается число видов и видовое разнообразие биологических сообществ. В зоопланктонном сообществе число видов уменьшается с 19–36 в природно-чистых озерах до 10–13 в загрязняемых, число видов простейших с 18–28 до 5–11 соответственно. Эта тенденция проявляется и у фитопланктона. Однако процессы самоочищения в этих озерах идут достаточно активно.

В многочисленных молодых мелководных озерах (в полярных прудах), четко проявляются функциональные изменения – повышается интенсивность продукционных процессов, которые не сопровождаются повышением деструкционных процессов, что снижает самоочистительную способность водоемов и их жизнеспособность. По уровню первичной продукции и содержания хлорофилла некоторые мелководные загрязняемые озера вполне сравнимы с эвтрофными умеренной зоны. В них отмечается продолжительное «цветение» воды за счет массового развития сине-зеленых водорослей. Это указывает на то, что мелководные озера Большеземельской тундры, а их большинство в этом районе, в наибольшей степени реагируют на антропогенное воздействие. Полученные материалы подтвердили, что для озер Большеземельской тундры вполне справедлива общеизвестная прямая связь между содержанием общего фосфора и продуктивностью фитопланктона. Очевидно также, что до определенной стадии загрязнение в районе нефтегазоразведки оказывает эвтрофирующее влияние на тундровые озера [Особенности структуры экосистем..., 1994].

Несмотря на то, что за последние полвека количество экспедиций в полярные области увеличилось, лишь на немногих полярных озерах были проведены комплексные исследования и систематические наблюдения, а подавляющее большинство полярных водоемов остаются до сих пор малоизученными. При этом экосистемы Арктики и Антарктики в силу замедленного метаболизма сильно уязвимы на фоне возрастающего антропогенного воздействия и изменения климата. В связи с этим в период с 2007 по 2010 гг. под руководством Сергея Валентиновича Рянжина была предпринята попытка обобщить имеющиеся данные по полярным озерам.

В ходе исследования были проанализированы данные о пространственном распределении озер Арктики и Антарктики, генезисе происхождения озерных котловин, термическом режиме [Полярные озера мира..., 2007; Полярные озера мира..., 2010]. Впервые были даны оценки водных ресурсов полярных озер. Авторским коллективом исследованы выборки из 1432 арктических и 174 антарктических озер. Анализ распределения озер показал, что в арктических областях сосредоточено значительно больше озер, чем в Антарктике, что связано со сложностью проведения полевых антарктических исследований и ограниченными естественными условиями лимногенеза в антарктической зоне. При этом в обеих зонах озер площадью больше 50 км² крайне мало – 7 % от всех крупных озер мира. Примечательно, что антарктические озера являются заметно глубже арктических.

Одной из особенностью полярных озер является наличие в южных полярных областях значительного количества солоноватых, соленых и гиперсоленых (соленость больше 35 %) водоемов. Это обусловлено различиями в режиме увлажненности арктических и антарктических территорий. Северные полярные озера испытывают значительные сезонные колебания солёности, вызванные особенностями водного баланса в этих областях. Озера полярных областей уникальны по своим температурным режимам, часто встречаются «экзотические» по термическим режимам озера – холодных меромиктические и амиктические. Последние характеризуются круглогодичным ледовым покровом (толщиной более 3–4 м) и поддержанием теплозапаса и теплового баланса на границе вода-лед за счет геотермального потока на границе озеро-дно. Озера такого типа чаще встречаются в Антарктике. К меромиктическим полярным озерам, с ослабленным вертикальным обменом, в полярных областях в основном относятся соленые и гиперсоленые водоемы.

В исследовании, проведенном под руководством С.В. Рянжина, показано, что полярные озера в основном имеют ледниковое происхождение (40 % для арктических и 46 % – для антарктических озер). В северном полушарии также распространены карстовые озерные котловины (39 %) и почти полностью отсутствуют вулканические. В южном полушарии распространение получили прибрежные лагунные озера (31 %) и полностью отсутствуют водоемы карстового и речного происхождения. На основе имеющихся на тот момент данных под руководством С.В. Рянжина были проведены оценки нижней границы суммарной площади озер, которые для Арктики составили 51 тыс. км², а для Антарктики 800 км² (коэффициенты озерности соответственно 0,005 и $6,2 \cdot 10^{-5}$). Объемы озерной воды северных полярных озер составили 591,8 км³, а южных – 28,4 км³. По оценкам С.В. Рянжина, суммарные площади полярных озер не превышают 2 %, а суммарные объемы 0,35 % от глобальных значений. Изучение водных ресурсов арктической зоны в Институте озероведения были продолжены в 2019–2023 гг. в рамках выполнения темы НИР «Закономерности распределения озер по территории Евразии и оценка их водных ресурсов». В исследованиях последних лет под руководством А.В. Румянцева показано, что в пределах арктической зоны нашей страны сосредоточено

2/3 её водных ресурсов. По данным современных спутниковых снимков в Арктике было дешифровано 2,5 млн озер площадью больше 1 га. Суммарная площадь озер составила около 160 тыс. км², а суммарный объем водных ресурсов примерно 760 км³ [Румянцев, Измайлова, Крюков, 2018; Румянцев, Измайлова, Макаров, 2021].

В последнее десятилетие, с развитием методов дистанционного зондирования Земли и применения его в моделировании, для изучения труднодоступных регионов, в том числе арктических, при исследовании озерных экосистем стали активно применять модели, основанные на данных дешифрования спутниковых снимков.

Эколого-геохимические исследования озер полярных регионов. В последние годы исследования указанного направления сфокусированы на изучении фундаментальных вопросов трансформации гумусового вещества озерных экосистем в различных климатических условиях, а также на оценке его роли в аккумуляции микроэлементов, в том числе, загрязнителей окружающей среды. Кроме того, гумусовое вещество является глобальным резервуаром углерода, поэтому процессы его минерализации сопряжены с образованием и эмиссией в атмосферу парниковых газов. Так как территория Арктической зоны РФ характеризуется высокой степенью заозеренности, то данный аспект исследования становится особенно важным в контексте вопроса изменения климата и деградации вечной мерзлоты.

С 2017 по 2023 гг. было изучено более 50 озер Арктики и Антарктики. Объекты исследований расположены в областях, характеризующихся различными климатическими, геологическими и мерзлотными условиями, а также степенью антропогенного воздействия: Кольский п-ов, п-ова Рыбачий и Средний, дельта р. Лены, Полярный Урал, п-ов Ямал, арх. Шпицберген, Антарктика. Исследования донных отложений озер в Институте озераведения РАН проводились в рамках темы FMG 0154–2019-0003 «Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки».

Озера урбанизированных территорий Кольского полуострова. Комплексные лимнологические исследования в данном регионе проводились в 2019–2021 гг. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН совместно с Институтом озераведения РАН. Мурманская область является индустриально развитым регионом России, поэтому водные объекты территории подвержены интенсивному антропогенному воздействию от горно-промышленных предприятий и городской инфраструктуры [The hydrochemistry and recent..., 2020]. Для исследования были выбраны озера самой крупной городской агломерации, расположенной севернее Полярного круга у г. Мурманска. Город расположен на границе лесной и тундровой зон, климат является морским субарктическим, смягченным теплым Северо-Атлантическим течением. Основными источниками загрязнения Мурманска являются: ТЭЦ, работающая на мазуте; торговый порт, осуществляющий погрузку и выгрузку угля; завод по переработке твердых бытовых отходов [The hydrochemistry and recent..., 2020].

На первом этапе работ был оценен общий уровень загрязнения водоемов, а также установлены тяжелые металлы, которыми в наибольшей степени обогащены колонки донных отложений. Подробное описание физико-географических и морфометрических характеристик изученных озер, а также методы пробоотбора представлены в статьях [The hydrochemistry and recent..., 2020; Guzeva, Slukovskii, Dauvalter, Denisov, 2021]. В работах были также проанализированы формы нахождения металлов в донных осадках и оценена роль органического вещества в аккумуляции поллютантов (V, Co, Sn, Ni, Cr, Mn, Cd, Cu, Pb, Sb, Zn) [Guzeva, Slukovskii, Dauvalter, Denisov, 2021]. В результате исследования выявлена высокая степень обогащения современных слоев отложений по сравнению с фоновыми (доиндустриальными) (Cd, Pb, Sb, Zn, Cu, V и Ni). Фазовый анализ металлов показал, что они преимущественно ассоциированы с устойчивыми минеральными соединениями и поэтому слабо доступны для живых организмов. Важно отметить, что органическое вещество играет важнейшую роль в накоплении металлов в озерах г. Мурманска. Сапропелевые отложения в данных водных объектах обогащены органическим веществом (от 10 до 50 %), поэтому гумусовые кислоты способны образовывать с тяжелыми металлами прочные комплексы, снижая их биодоступность в экосистемах. Для более подробного исследования состава и строения гумусового вещества, а также оценки его комплексообразующей способности отбирались пробы поверхностных донных отло-

жений (0–10 см). Согласно международной методике IHNS (International Humic Substances Society), из донных отложений выделялась доминирующая фракция гумусового вещества – гуминовые кислоты. Далее с помощью наиболее современных методов анализировался их элементный состав (CHN-анализ) и молекулярное строение (13С-ЯМР и ИК-спектromетрия). Параметры измерений детально описаны в статье [Guzeva, Krylova, Fedorova, 2021]. В результате исследования показано [Guzeva, 2022], что степень гумификации органического вещества в озерах очень слабая. Данный факт может быть связан как с холодными климатическими условиями, так и высоким уровнем антропогенного загрязнения озер. Макромолекулы гуминовых кислот имеют преимущественно алифатическую структуру, характеризуются высокими содержаниями кислорода (гидрофильностью), из-за чего могут активно выщелачивать металлы из компонентов донных отложений. В структуре отдельных молекул гуминовых кислот практически не обнаруживаются хелатообразующие функциональные группировки, однако, несмотря на это, фракция устойчивых металлоорганических комплексов, как отмечалось выше, обнаруживается в донных отложениях всех исследованных озер. Следовательно, их образование определяется преимущественно общим количеством органического вещества в осадках: чем выше содержание органики, тем больше сайтов связывания для металлов-загрязнителей существует. Кроме того, порообразующие оксиды, а также органические вещества-загрязнители (нефтяные углеводороды) могут вступать в конкуренцию с металлами за электрон-донорные центры в гуминовых кислотах. Так, отложения оз. Ледового содержат наименьшее количество органического вещества, сильно загрязнены нефтепродуктами [Guzeva, Slukovskii, Myazin, 2020], а доля металлов в органической фракции здесь самая низкая (рис. 7.2). Стоит также отметить, что в результате вовлечения во взаимодействия с металлами менее сильных функциональных группировок гумусовых кислот, могут формироваться менее прочные металлоорганические комплексы. Данные аспекты важны при оценке риска вторичного загрязнения водной толщи озер Арктической зоны РФ, а также разработки оптимальных методов их геоэкологического мониторинга.

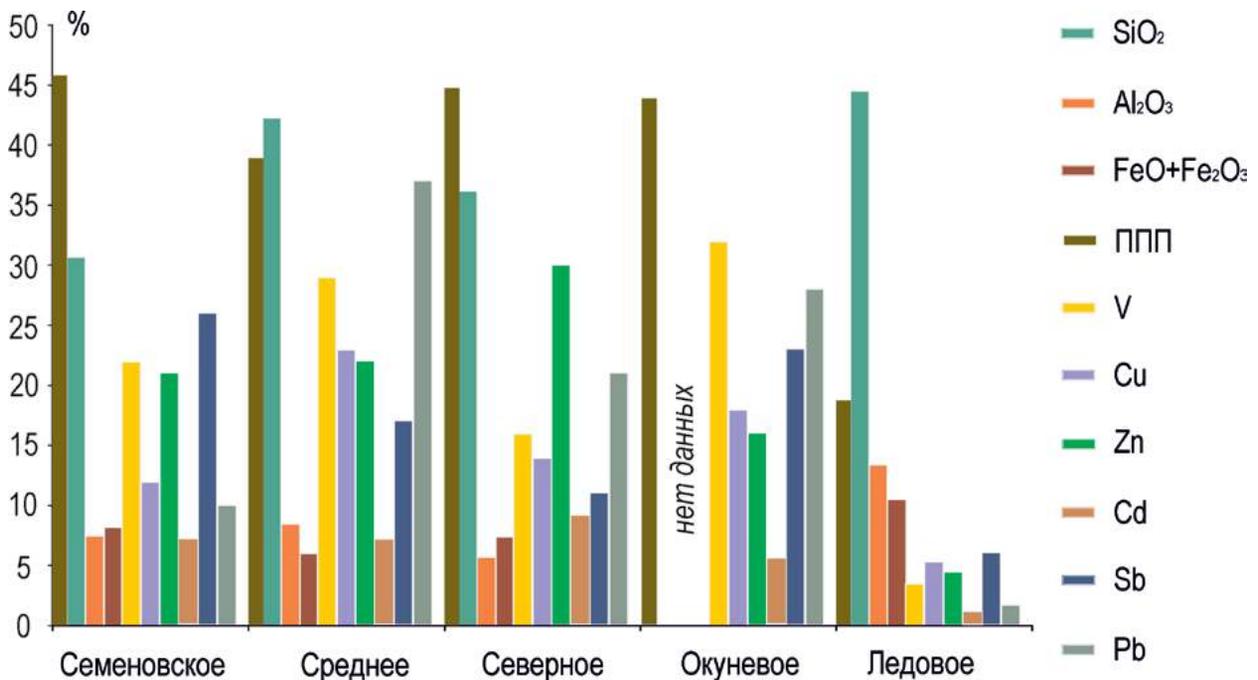


Рис. 7.2. Геохимические характеристики озерных отложений г. Мурманска: ППП – потери при прокаливании, содержание органического вещества (%); содержание SiO₂, Al₂O₃, и FeO+Fe₂O₃ [The hydrochemistry and recent..., 2020; Guzeva, Slukovskii, Myazin, 2020]; для металлов представлено усредненное содержание органоминеральной фракции (% от валового содержания) в слое колонок 0–10 см

Тундровые озера Арктической зоны РФ. Исследование малых тундровых озер проходило на потенциально чистых территориях, незатронутых интенсивной антропогенной деятельностью. Были исследованы водные объекты полуостровов Рыбачий и Средний, а также озера регионов,

где распространены многолетнемерзлые породы и активно развиты термокарстовые процессы: дельта р. Лены, Полярный Урал и прилегающая часть ямальской тундры. Все озера по величине минерализации вод относятся к пресным и ультрапресным. В комплексные лимнологические исследования были включены: отбор проб воды и донных отложений, выделение гуминовых кислот и дальнейший их лабораторный анализ по стандартным методикам.

Озера дельты р. Лены изучались сотрудницей Института озерадения РАН А.В. Гузевой в летний период 2019 г. в рамках Российско-Германской экспедиции «LENA-2019». Дельта р. Лены расположена на севере Якутии и является крупнейшей по площади в Арктике. Территория характеризуется арктическим континентальным климатом, повсеместно распространена многолетняя мерзлота. В пределах дельты сосредоточено более 60 тысяч озер, имеющих преимущественно термокарстовое и старичное происхождение. Площадь зеркал большинства водных объектов не превышает 1 км². Определяющими факторами формирования гидрохимического состава озер являются термокарстовые процессы и паводковой режим р. Лены. В рамках полевых работ пробы донных отложений были отобраны из 13 озер, расположенных на трех островах дельты: о. Самойловский, о. Курунгнах, о. Сардах. Озера характеризуются разным генезисом и режимом затопления речными водами. Подробное физико-географическое и геоморфологическое описание территории представлено работах автора [Гузева, Федорова, 2020; Guzeva, Krylova, Fedorova, 2021; Guzeva, Krylova, Fedorova, 2021; Гузева, Елизарова, Лапенков, Слуковский, 2022].

Озера полуостровов Рыбачий и Средний были исследованы в июле 2020 г. во время экспедиционных работ, проводимых Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН совместно с Институтом озерадения РАН – СПб ФИЦ РАН [Гузева, Слуковский, 2023] (рис. 7.3). Полуострова находятся в северо-западной части побережья Баренцева моря в зоне субарктической тундры. Водные объекты представлены преимущественно малыми озерами небольшой глубины, окруженными скалистыми берегами с мохово-лишайниковым покровом. В пределах полуостровов нет крупных промышленных объектов, ближайшее предприятие «Печенганикель» расположено в 50–70 км.



Рис. 7.3. Колонки донных отложений, отобранные из озер п-ова Рыбачий в 2020 г.

Озера Полярного Урала и прилегающей части ямальской тундры изучались в рамках экспедиции Воркута-Салехард весной 2022 г., организованной сотрудниками ФГБУ ААНИИ (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт) и ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН [Демидов, Гузева, Лапенков, 2022]. Идея экспедиции состояла в том, чтобы в рамках одного снегоходного маршрута охватить три физико-географических зоны – восточную часть Большеземельской тундры, горы Полярного Урала и юг полуострова Ямал. В научные задачи экспедиции входили геокриологические и лимнологические исследования. Климат Полярного Урала суровый, в горах повсеместно развита вечная мерзлота. Растительность скудная – тундровая. В пределах горной системы насчитывается свыше 3000 озёр, большая часть которых имеет тектонико-ледниковое происхождение, а крупнейшим является оз. Большое Щучье (рис. 7.3). С восточной стороны к горной системе прилегает тундра южной части п-ва Ямал, характеризующаяся высокой степенью заозерности. Озера на Ямале образуются за счет интенсивного развития термокарстовых процессов. В ландшафте начинает появляться кустарниковая и древесная растительность. В период полевых работ пробы воды и донных отложений были отобраны с ледового покрова пяти озер – двух горных и трех тундровых.



Рис. 7.4. Отбор проб воды и донных отложений сотрудниками ИНОЗ РАН А.В. Гузевой и А.Е. Лапенковым на оз. Большое Щучье в 2022 г.

Результаты исследования показали, что изученные отложения озер по содержанию органического вещества относятся преимущественно к минеральным и слабосапропелевым илам. При этом в большинстве малых озер п-овов Рыбачий и Средний [Гузева, Слуковский, 2023], а также дельты р. Лены [Guzeva, Krylova, Fedorova, 2021; Guzeva, Krylova, Fedorova, 2021] присутствуют многочисленные слаборазложившиеся растительные остатки, что свидетельствует о замедленных процессах постседиментационной деградации органического материала. Элементный состав гуминовых кислот характерен для гуминовых веществ, образующихся в холодных климатических условиях: молекулы обеднены азотом и углеродом, но значительно обогащены кислородом и водородом

(табл. 7.1), что говорит о значительной гидрофильности молекул. В целом, гуминовые кислоты арктической зоны по составу в большей степени сходны с фульвовыми, чем с «классическими» гуминовыми кислотами почв [Кононова, 1963]. Во всех образцах гуминовых кислот, как и в озерах г. Мурманска, преобладают алифатические фрагменты, что свидетельствует о низкой степени зрелости (конденсированности) молекул гумусовых веществ. В тундровой зоне, где доминирует мохово-лишайниковая растительность, содержание лигнина в растительных остатках минимально, поэтому слабую ароматичность гуминовых кислот можно объяснить низким содержанием ароматических веществ в прекурсорах гумификации. Связь между степенью конденсации макромолекул и климатическими особенностями Арктики выявлена и для гуминовых кислот почв. Кроме того, микробная активность в холодноводных условиях относительно замедлена, из-за чего процессы гумификации выражены слабо. Перечисленные особенности структуры свидетельствуют об относительно низкой устойчивости молекул гумусовых веществ к окислению (минерализации), что необходимо учитывать при оценках роли лимносистем в эмиссии газов в атмосфере.

Табл. 7.1. Элементный состав гуминовых веществ, выделенных из разных источников [Гузева, Слуковский, 2023]

Источники гуминовых веществ	N	C	H	O
	%			
Гуминовые кислоты почв ¹	3,5–5	52–62	3–5,5	30–33
Фульвокислоты почв ¹	2–4	44–49	3,5–5	44–49
ГК донных отложений озер дельты р. Лены ²	1–3	20–48	3–6	40–70
ГК донных отложений озер г. Мурманска ³	2–3	33–49	5–6	38–54
ГК донных отложений озер п-ова Средний и Рыбачий ⁴	2–4	26–46	4–5	40–60

Примечание ¹ – по данным М.М. Кононова [1963]; ² – по данным А.В. Guzeva, Е.А. Krylova, I.V. Fedorova [2021]; ³ – по данным А.В. Guzeva [2022]; ⁴ – по данным А.В. Гузева, З.И. Слуковский [2023]

Озера Антарктики. Изучение озер ледяного континента проходило в 2022 г. в рамках сезонных работ 67-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) на ст. Беллинсгаузен (о. Кинг-Джордж) и ст. Русская (Западная Антарктида). Научная программа отряда лимнологии была разработана с учетом задач темы НИР FMG 0154–2019-0003 Института озерадения РАН – СПб ФИЦ РАН. Озера этих территорий представляют большой интерес в виду низкой степени их общей изученности, а также с точки зрения дополнения информации о процессах трансформации органического вещества в экстремальных климатических условиях. В задачи полевых исследований входили следующие аспекты: батиметрическая съемка, измерение гидрохимических параметров водной толщи озер (рН, Eh, минерализация, электропроводность, мутность), отбор проб воды для химических анализов, отбор проб донных отложений для геохимических анализов и измерения их физико-химических характеристик (рН и Eh).

На о. Кинг-Джордж в районе ст. Беллинсгаузен исследовано 15 озер, расположенных в свободной от ледника южной части острова (п-ов Файлдс). Все озера в летний период вскрываются от ледового покрова. Для наиболее крупных водных объектов (оз. Китеж, оз. Средне, оз. Слаломное, оз. Мираж, оз. Глубокое, оз. Длинное) проведена подробная батиметрическая съемка (рис. 7.5). Максимальная глубина 18,3 м зафиксирована для оз. Глубокое, находящегося рядом с уругвайской научной станцией Артигас. Берега озер чаще скалистые со скудной мохово-лишайниковой растительностью, сложены преимущественно андезибазальтами. Дно некоторых крупных озер покрыто мощными зарослями зеленого мха. Воды всех исследованных озер полуострова по показателю рН относятся к слабокислым – нейтральным, минерализация не превышает 0,14 г/л, что классифицирует их как ультрапресные. Озерные отложения в прибрежной зоне представлены крупными обломками горных пород, в глубоководной части постепенно переходят в алевроитово-глинистые илы серого и коричневого цвета. Донные осадки большинства озер характеризуются окислительными и переходными условиями. В некоторых водоемах показатель Eh опускается в слабо отрицательные значения, а при

отборе проб отложений обильно выходят пузыри газов (оз. Слаломное, оз. Среднее, оз. Длинное). Содержания органического вещества в осадках озер невысокие и варьируют от 4 до 8 %. При выделении гумусовых кислот показано, что они преимущественно представлены слабоокрашенными светлыми фульвокислотами, а гуминовые кислоты во многих пробах донных отложений не выпадают в осадок даже в сильнокислых условиях. Однако в 13С-ЯМР спектрах образцов, из которых удалось выделить «истинные» гуминовые кислоты, обнаруживаются спектральные линии разновидностей углерода, что позволит в дальнейшем судить об особенностях, идущих в озерах Антарктики, процессов гумификации.



Рис. 7.5. Отбор колонки донных отложений А.В. Гузевой и З.И. Слуковским на оз. Китеж рядом со станцией Беллинсгаузен в период сезонных работ 67-й Российской антарктической экспедиции

Станция Русская – это единственная станция на участке побережья протяженностью около 3500 км между американской станцией Мак Мердо и Антарктическим полуостровом. Она находится на восточном берегу моря Росса на Земле Мэри Бэрд. О природных условиях данного участка суши береговой зоны Антарктиды до сих пор имеются очень ограниченные сведения. Общая площадь не покрытой ледником территории составляет около 2,2 км². Растительность представлена скудными пятнами мхов и лишайников. В сезон 67-й РАЭ в феврале 2022 г. НЭС «Академик Трешников» прибыло на ст. Русская с целью изыскательских работ под строительство нового зимовочного комплекса. Параллельно с инженерными изысканиями сотрудниками ААНИИ проведено обследование озер территории, многие из которых не были известны ранее [Демидов, Гузева, 2022]. В общей сложности было исследовано 18 озер длиной от 30 до 300 м, максимальная зафиксированная глубина – 5,1 м. Практически все озера круглый год покрыты льдом, однако к концу антарктического лета полностью вскрывшимися оказались два озера – Мелкое и Гуминовое. Водная толща всех водных объектов характеризуется высокой прозрачностью, что хорошо видно на фотоизображениях подводной съемки (рис. 7.6). Стоит отметить, что на данном участке обнаружено наличие одновременно пресных и соленых озер: минерализации воды в одном из озер достигает 33,5 г/л. Показатель рН варьирует от 5,9 до 8,9. Донные отложения представлены крупным щебнем и глыбами, на некоторых из которых встречались редкие хлопьевидные биогенные пленки. Исключением стало оз. Гуминовое, названное так потому, что под скоплением биогенных матов были обнаружены илистые донные отложения черного цвета, с сильным гнилостным запахом и жирные на ощупь. Пробы из оз. Гуминового были доставлены в лабораторию Института озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН, где далее из них экстрагировались гуминовые кислоты. Результаты 13С-ЯМР спектроскопии показали, что данные вещества имеют все структурные элементы гумусовых веществ (рис. 7.7). Таким

образом, в результате работ 67 РАЭ на свободном ото льда участке, где находится ст. Русская, впервые обнаружены озера, в отложениях которых протекают полноценные процессы биохимической трансформации органического вещества – гумификации. Кроме того, если ранее этот участок суши классифицировался как нунатак, то на основании собранных об озерах сведений его следует отнести к приморским низменным антарктическим оазисам.

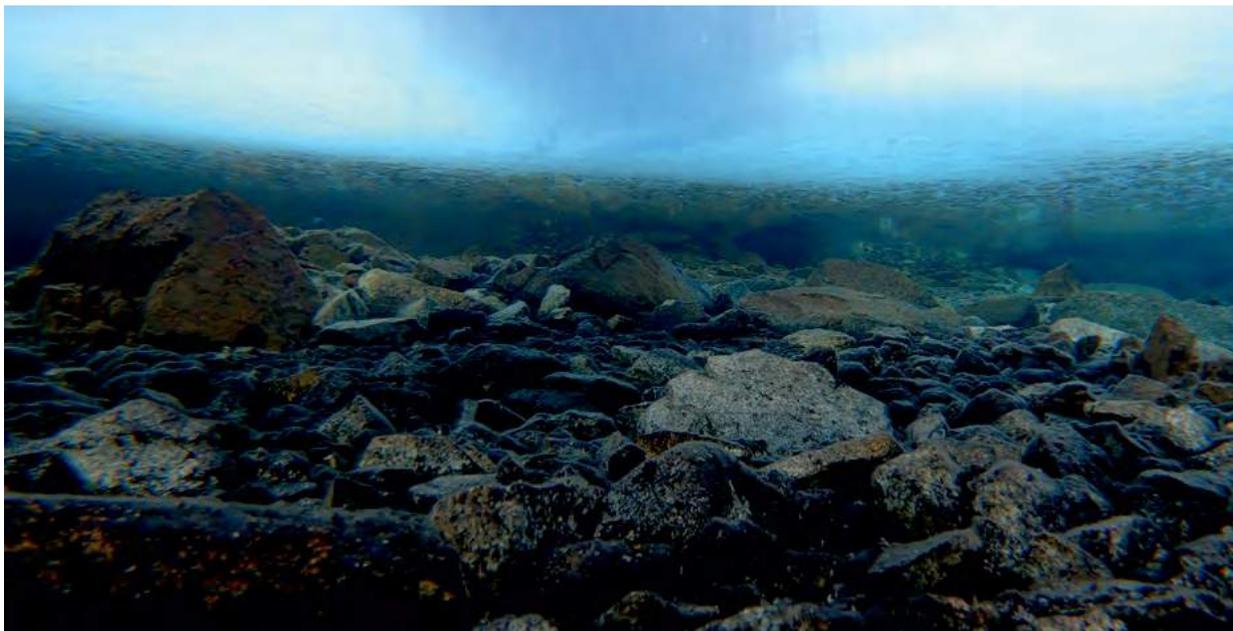


Рис. 7.6. Подводное изображение одного из озер ст. Русская, фото А.Н. Николаева [Демидов, Гузева, 2022]

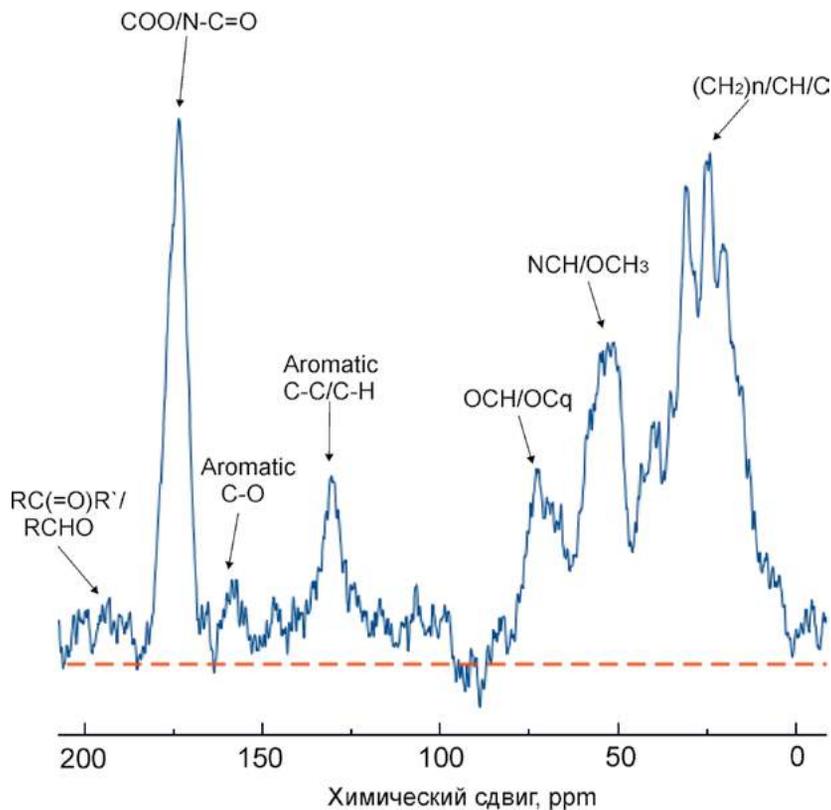


Рис. 7.7. ¹³C-ЯМР спектр гуминовых кислот, выделенных из донных отложений оз. Гуминового (ст. Русская, Западная Антарктида)

Озера высокоширотной Арктики. В 2023 г. исследования озер полярных регионов Институтом озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН были продолжены в составе сезонных работ РАЭ-Ш АНИИ на арх. Шпицберген. Научные задачи экспедиции включали продолжение широкого круга геохронологических исследований [Мерзлотно-гидрогеологические условия..., 2020] и изучение геохимических особенностей донных отложений термокарстовых озер и подозерных таликов. Район работ относится к Земле Норденшельда и расположен на западном побережье о. Западный Шпицберген. Климат этого арктического архипелага смягчен теплым Западно-Шпицбергенским течением. Территория характеризуется сплошным распространением мерзлых пород, средняя мощность сезонного талого слоя составляет 1,5 м. Растительность представлена разряженными травянисто-мохово-лишайниковыми группировками.

В течение полевых работ были отобраны пробы воды и донных отложений из шести малых термокарстовых озер (рис. 7.8). Изучаемые водные объекты находятся в долинах Грендален (оз. Грендаль и оз. Фили), Рейндален (оз. R1 и оз. R2) и Колес (оз. Фара), а также на лестнице морских террас в районе мыса Хеероден (озеро на геофизическом полигоне). Глубины озер не превышают 5 м, толщина ледового покрова составляет в среднем 1 м. Минерализация озерных вод варьирует от 0,9 до 2,6 г/л, что позволяет отнести их к солончатым. Показатель pH преимущественно сдвинут в щелочную сторону 7,5–8,2, однако в оз. Грендаль он понижается до сильнокислого – 4,4. Озерные отложения представлены преимущественно коричневыми и серо-черными илами, частично оторфованными, во многих объектах обнаруживается большое количество плохо разложившихся растительных остатков. В некоторых озерах при отборе проб наблюдался обильный выход пузырей сероводорода, определяемого по характерному запаху от воды и донных отложений. Лед на этих озерах характеризуется наличием значительного количества газовых включений. Содержание органического вещества в донных отложениях в среднем составило 7–10 %, а в оз. Фили, находящимся рядом с одноименным булгуньяхом, 27 %. Результаты изучения выделенных из донных отложений гумусовых веществ будут использованы для сравнительного анализа с другими регионами Арктики, а также Антарктики.



Рис. 7.8. Отбор проб донных отложений на оз. Грендаль, о. Западный Шпицберген

На оз. Фили, которое зимой оказалось замороженным до дна, была пробурена скважина глубиной 5 м (рис. 7.9). Геохимические исследования кернов, отобранных из подозерного талика, позволят более широко понимать процессы трансформации органического вещества криолитозоны, а также оценить роль гумусового вещества в аккумуляции некоторых химических веществ, в частности, ртути, которая очень широко обсуждается в научных работах последних лет.



Рис. 7.9. Бурение скважины Н.Э. Демидовым с ледового покрова озера в долине Грендален, о. Западный Шпицберген

Модельная оценка испарения с поверхности водосборов арктических озёр. В 60-х годах прошлого века под руководством академика АН СССР С.В. Калесника в Институте озераедения сложилась школа комплексного изучения озёр, уделяющая большое внимание изучению взаимосвязи озёр с окружающим ландшафтом. В рамках концепции этого научного направления в 2021–2022 годах в Институте озераедения была проведена оценка суммарного испарения (эвапотранспирации) для различных природных зон Арктики – тундры, лесотундры, областей высотной поясности и зоны тайги [Расулова, 2023].

Суммарное испарение с водосбора является неотъемлемой частью общей увлажнённости территории и водного баланса озёр, которые тесно связаны с ландшафтом, климатическими и гидрогеологическими процессами, происходящими в озерных бассейнах. Расчет суммарного испарения (ET) проводился с помощью комбинированной биофизической модели Пенмана-Монтейта-Леунинга (PML, модификация PML_V2) [A simple surface conductance..., 2008], которая хорошо согласуется с экспериментальными данными на Ладожском и Сайма-Вуксинском водосборе [Расулова, 2021a; 2021б]. Отличительной особенностью модели является разделение компонент суммарного

испарения на ее составляющие (транспирацию растительности (E_t), испарение с почвы (E_s) и испарение осадков, задержанных растительностью (E_i)), что позволяет определить эффективность использования водных ресурсов конкретной экосистемой.

Определение каждой из компонент полного испарения на основе метода Пенмана-Монтейта учитывает климат исследуемого региона, типы подстилающей поверхности и разнообразие растительного покрова. Модель основывается на уравнении теплового баланса и массопереноса с открытой водной поверхности. Уравнение Пенмана-Монтейта включает в себя информацию о растительности и почве в виде аэродинамического сопротивления и теплового потока почвы. В свою очередь аэродинамическое сопротивление учитывает перенос тепла и паров воды с поверхности растения. В модификации PML_V2 модель Пенмана-Монтейта-Леунинга дополнена устьичной проводимостью листьев растений. Упрощенная схема работы модели приведена на рис. 7.10 [Coupled estimation of 500 m..., 2019]. На вход модели подаются данные со спутника MODIS, с модели реанализа GLDAS (Global Land Data Assimilation System) и данные о растительном покрове с IBGP (International Biosphere Geosphere Program). Версия программы PML_V2 имеет 11 свободных параметров, отвечающих за фотосинтез растений и учитывающих их отклик на климатические изменения. Рассчитанные выходные параметры поступают на вход в платформы обработки геопространственных данных Google Earth Engine (GEE).

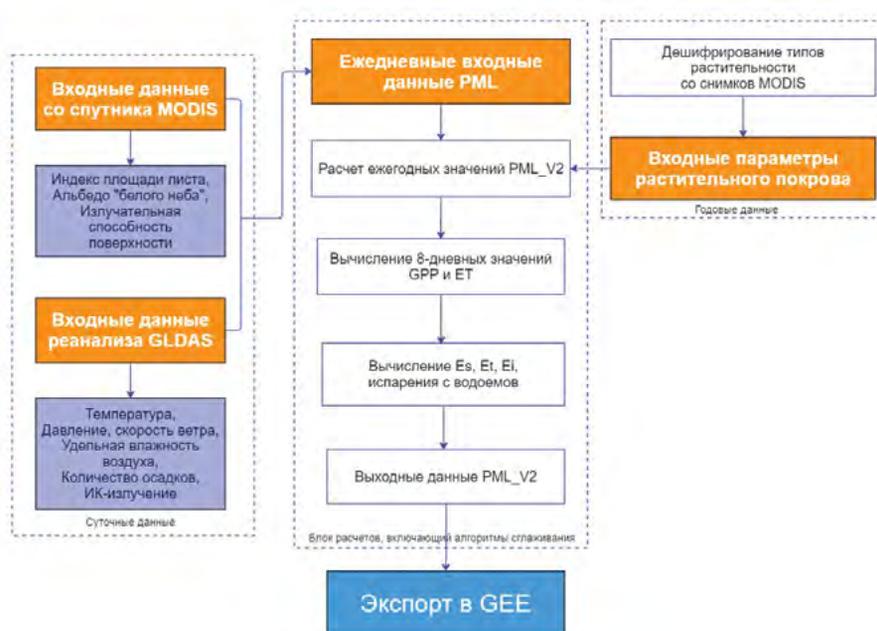


Рис. 7.10. Блок-схема реализации модели Пенмана-Монтейта-Леунинга в GEE

При расчетах эвапотранспирации исследуемая территория была разделена на природные зоны (тундры, лесотундры, областей высотной поясности и зоны тайги) и ограничена с юга Северным полярным кругом. В работе не учитывалась зона полярной пустыни, состоящая в основном из островов Северного Ледовитого океана.

Результаты расчета эвапотранспирации по модели PML_V2 приведены на рис. 7.11. Рассчитанное среднее многолетнее испарение в тундре составляет 132 мм/год. При этом максимальное – 2,054 мм/сут. было достигнуто в начале июня 2012 г. Наибольшее значение эвапотранспирации приходится на летние месяцы – вегетационный период (с начала июня до начала августа). На испарение с почвы (E_s) в среднем за год приходится 93 мм, на транспирацию воды растительностью (E_t) – 37 мм. Зоны высотной поясности по испарению во многом схожи с тундрой. В этой регионе среднее многолетнее годовое испарение составляет 166 мм/год. Большая величина полного испарения в зоне высотной поясности связана с более интенсивной транспирацией и испарением с почвы, которые на 2 % больше, чем в тундре.

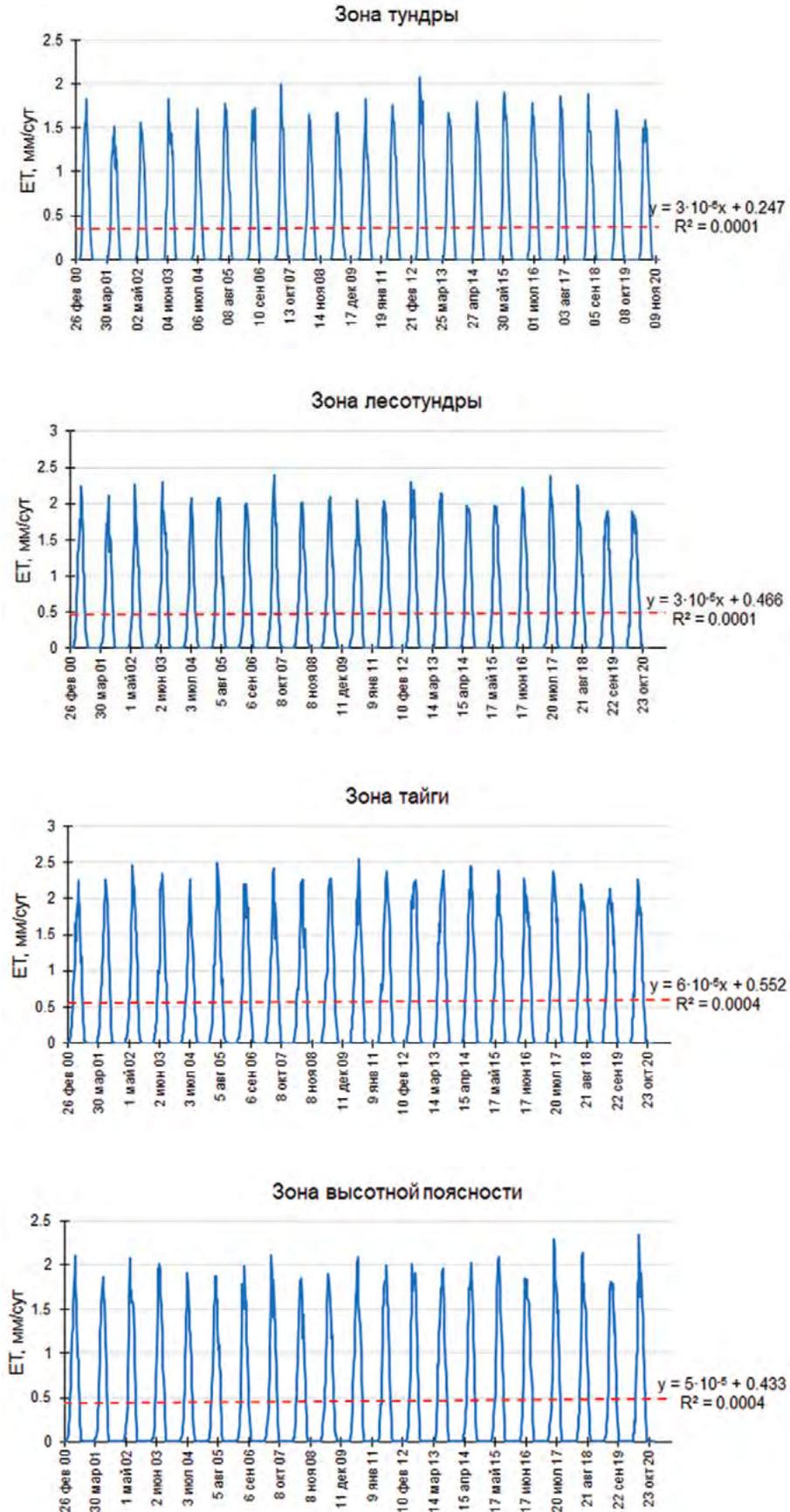


Рис. 7.11. Динамика эвапотранспирации по модели PML_V2 на территориях различных арктических природных зон с 26 февраля 2000 по 26 декабря 2020 гг.

В лесотундре согласно расчетам по модели PML_V2 среднее многолетнее ежегодное ET составляет 174 мм/год, из них 108 мм/год приходится на Es . Максимальное значение ET за период наблюдения в лесотундре отмечено в конце июня 2007 г. и достигло рекордных для этой природной зоны 2,398 мм/сут. В вегетационный период с середины июля до середины августа наблюдаются наибольшие значения Ei , для Es максимальные значения достигались с конца мая по конец августа. Из периодов изменений Et в этой зоне хорошо видно увеличенный вегетационный период по сравнению с тундрой, связанный с более ранним снеготаянием.

Среди всех природных арктических зон северная тайга имеет наибольшее значение ET , среднегодовые значения которого достигают 211 мм/год. В таежной зоне уже большая доля приходится на транспирацию воды с растительности и испарение с почвы ($Ec = 82$ мм/год, $Es = 126$ мм/год).

На вклад в эвапотранспирацию испарения осадков, задержанных растительностью (Ei), во всех природных зонах Арктики приходится не более 1 %. Наибольшие значения Ei наблюдаются в тайге и составляют $1,6 \cdot 10^{-2}$ мм/сут, наименьшие – в зоне высотной поясности ($6,51 \cdot 10^{-3}$ мм/сут). Около 70 % эвапотранспирации во всех природных зонах составляет испарение с поверхности воды. Следующий по значимости вклад в общее испарение вносит испарение с поверхности почвы (более 20 %), при этом в зоне тундры и высотной зональности оно наибольшее. Это связано со скудной растительностью данных регионов. В таежной природной зоне наименьший вклад в эвапотранспирацию вносит компонента Es и начинает больше преобладать Et .

Во всех природных зонах прослеживаются четкие сезонные циклы изменения эвапотранспирации. Но из рис. 7.11 видна тенденция незначительного увеличения полного испарения за исследуемые 20 лет. Расчеты показывают, что также увеличиваются все составляющие ET . Это является индикатором экологических изменений природного и антропогенного характера, происходящих в арктической зоне. Анализ полученных результатов показывает хорошее совпадение с натурными наблюдениями, проводимыми в разные годы в исследуемых экорегионах. Таким образом, совокупность данных дистанционного зондирования Земли и модели испарения Пенмана-Монтейта-Леунига позволяет дополнить недостаточные данные экспедиционных работ по исследованию изменений водного баланса и испарения, в частности, труднодоступных районах Арктики.

Дистанционная оценка характеристик озер арктической тундры. В 2023 г. в Институте озероведения выполнены исследования с целью разработки методики дистанционной оценки характеристик неизученных озер площадью до 100 км² тундровых ландшафтов нашей страны (рис. 7.12) на основе методов математического моделирования с использованием спутниковой информации. Характерной особенностью этой территории является наличие вечной мерзлоты.



Рис. 7.12. Тундровые природные зоны России: 1 – Кольские низкогорные тундры и редколесья, 2 – Большеземельские тундры, 3 – Ямало-Гыданские тундры, 4 – Северо-Таймырские арктические тундры, 5 – Североякутские тундры, 6 – Чукотские тундры, 7 – Тундры и редколесья Корякского нагорья (<https://ecoregions.appspot.com/>)

Большинство из исследуемых озер характеризуется малыми площадями и незначительными глубинами, составляющими от 1 до 2 м и лишь иногда – до 3 и более метров [Румянцев, Измайлова, Крюков, 2018]. Одной из основных особенностей таких водоемов является существенная горизонтальная однородность поля температуры в них и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры.

При невозможности выполнения контактных измерений характеристик озер, находящихся в труднодоступных областях, предлагается воспользоваться методикой оценки состояния озер, схема которой представлена на рис. 7.13 [Зверев, Голосов, Кондратьев, Расулова, 2023].

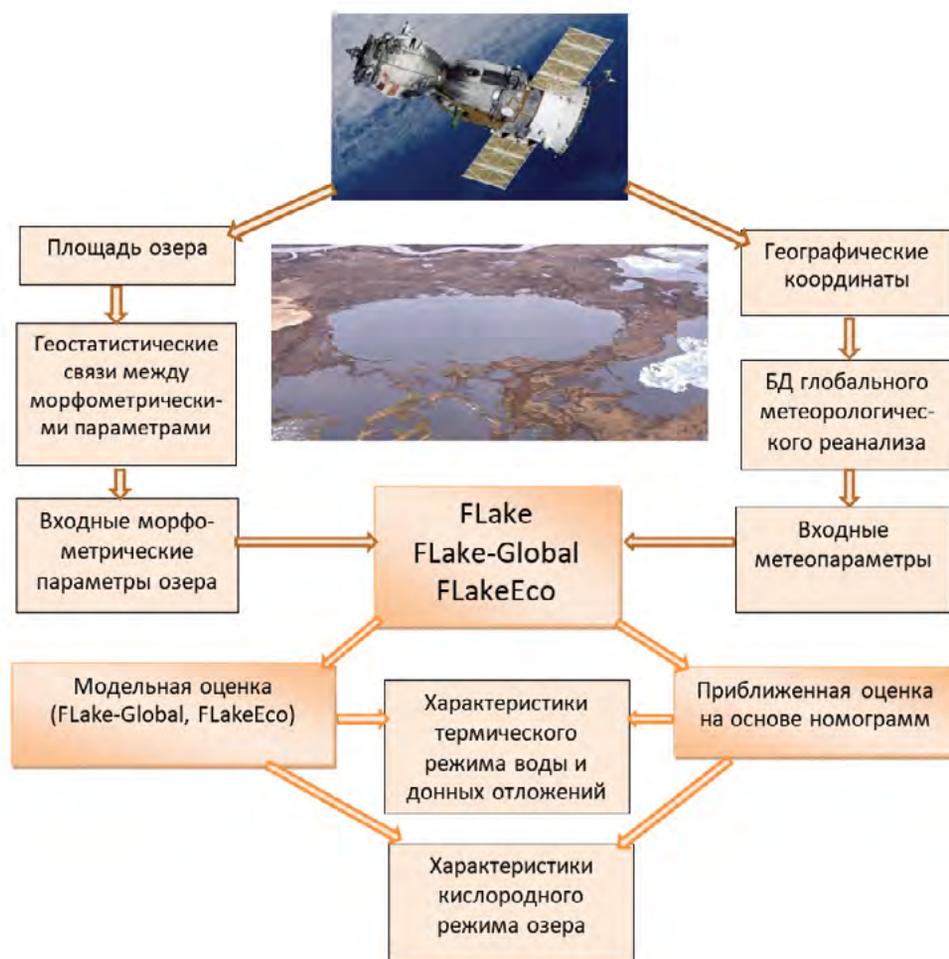


Рис. 7.13. Схема дистанционной оценки характеристик малых и средних неизученных труднодоступных водоемов

Основные этапы дистанционной оценки характеристик озер сводятся к следующему алгоритму. С использованием средств дистанционного зондирования поверхности Земли дешифрируется интересующий объект, находятся его географические координаты и площадь водной поверхности озера. На основе геостатистических соотношений между площадью и глубиной последняя оценивается для неизученных озер. По географическим координатам из баз данных метеорологического реанализа может быть получена метеоинформация требуемого разрешения. Глубина озера и метеоданные являются входными данными в модель FLakeEco, которая рассчитывает термические характеристики водоема, параметры его кислородного режима, а также теплоперенос в донных отложениях.

Инструментом дистанционной оценки характеристик неизученных озер в предлагаемой методике является модель FLake (www.lakemodel.net), разработанная совместными усилиями со-

трудников Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [Golosov, Kirillin, 2010; Implementation of the lake parameterization..., 2010]. Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы основные мировые достижения в области физической лимнологии. Модель FLakeEco представляет собой модификацию FLake, дополненную гидроэкологическим модулем, позволяющим рассчитывать режим растворенного кислорода в озерах [Гидрофизические аспекты формирования..., 2010; Physical background of the development..., 2007]. Продукт синтеза модели озера FLake и приповерхностных метеорологических данных из проекта реанализа NCEP/NCAR получил название FLake-Global [FLake-Global: Online lake..., 2011]. (www.lakemodel.net). В международном проекте COSMO (<https://www.cosmo-model.org/>) модель FLake используется при оценке влияния водной поверхности водоемов на локальный климат. Примеры верификации модели FLake на озерах Северо-Таймырской арктической тундры РФ представлены в работах [Термический режим озер..., 2011; Arctic climate variability, 2020].

При решении настоящей задачи математическое моделирование и результаты космической съемки применены для дистанционной оценки характеристик неизученных озер арктической зоны РФ [Зверев, Голосов, Кондратьев, Расулова, 2023]. В качестве исходных данных для расчетов по модели FLake использовались географические координаты объекта, значения его средней глубины (или площади, по которой можно вычислить глубину) и привязанные к координатам данные метеорологического реанализа NCEP/NCAR. Для всех семи зон тундры (рис. 7.12) в результате статистической обработки баз данных HydroLAKES [Estimating the volume and age..., 2016] по выбранным зонам получены эмпирические зависимости глубины озера от его площади.

При наличии необходимой исходной информации модель рассчитывает следующие характеристики выбранного озера:

- Теплоперенос между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями.
- Профиль температуры воды по глубине, температуру у поверхности и у дна.
- Профиль температуры в донных отложениях.
- Дату образования ледового покрова, его продолжительность и толщину.
- Глубину протаивания донных отложений в озерах зоны вечной мерзлоты.
- Профиль концентрации растворенного кислорода по глубине и толщину анаэробной зоны (при наличии).

В решаемой задаче расчеты выполнялись для семи точек, расположенных в представленных на рис. 7.12 семи областях зоны тундры, и соответствующих следующим озерам: 1 – оз. Бабозеро, Мурманская обл. (67.993980° с.ш., 37.603655° в.д.); 2 – оз. Порчты, Ненецкий автономный округ (67.888251° с.ш., 59.076433° в.д.); 3 – оз. Сохонто, Ямало-Ненецкий автономный округ (69.166749° с.ш., 70.109453° в.д.); 4 – оз. Сырутатурку, Красноярский край (73.685402° с.ш., 97.586035° в.д.); 5 – оз. Федота, Респ. Саха (71.168933° с.ш., 144.813443° в.д.); 6 – оз. Элэргытгын, Чукотский АО (68.804262° с.ш., 171.274288° в.д.); 7 – оз. Бурьпчи – Камчатский край (63.962810° с.ш., 168.493262° в.д.). К указанным точкам привязаны данные метеорологического реанализа семейства NCEP/NCAR, осредненные за тридцатилетний интервал времени.

По результатам проведенных расчетов построены номограммы, связывающие термические характеристики (средние значения температуры поверхностного слоя воды и толщины ледяного покрова) малых и средних озер со значениями их площадей для семи рассматриваемых зон тундры (рис. 7.14). Рис. 7.14а и 7.14б иллюстрируют зависимость средних значений температуры поверхности воды и толщины льда от площади озера в семи рассматриваемых зонах тундры. Пологая форма представленных графиков является следствием слабой зависимости глубины водоема от его площади, что является характерной особенностью тундровых озер. Разница в расположении графиков объясняется различной широтой рассматриваемых точек, а также региональными различиями данных метеорологического реанализа. Максимальные значения температуры поверхности воды и минимальная толщина льда характерны для Кольских низкогорных тундр и редколесей, подверженной влиянию теплого атлантического течения Гольфстрим. Противоположная картина наблюдается в результатах расчета по Северо-Таймырской арктической тундре (№ 4), североякутской (№ 5), и чукотской (№ 6) зонам тундры.

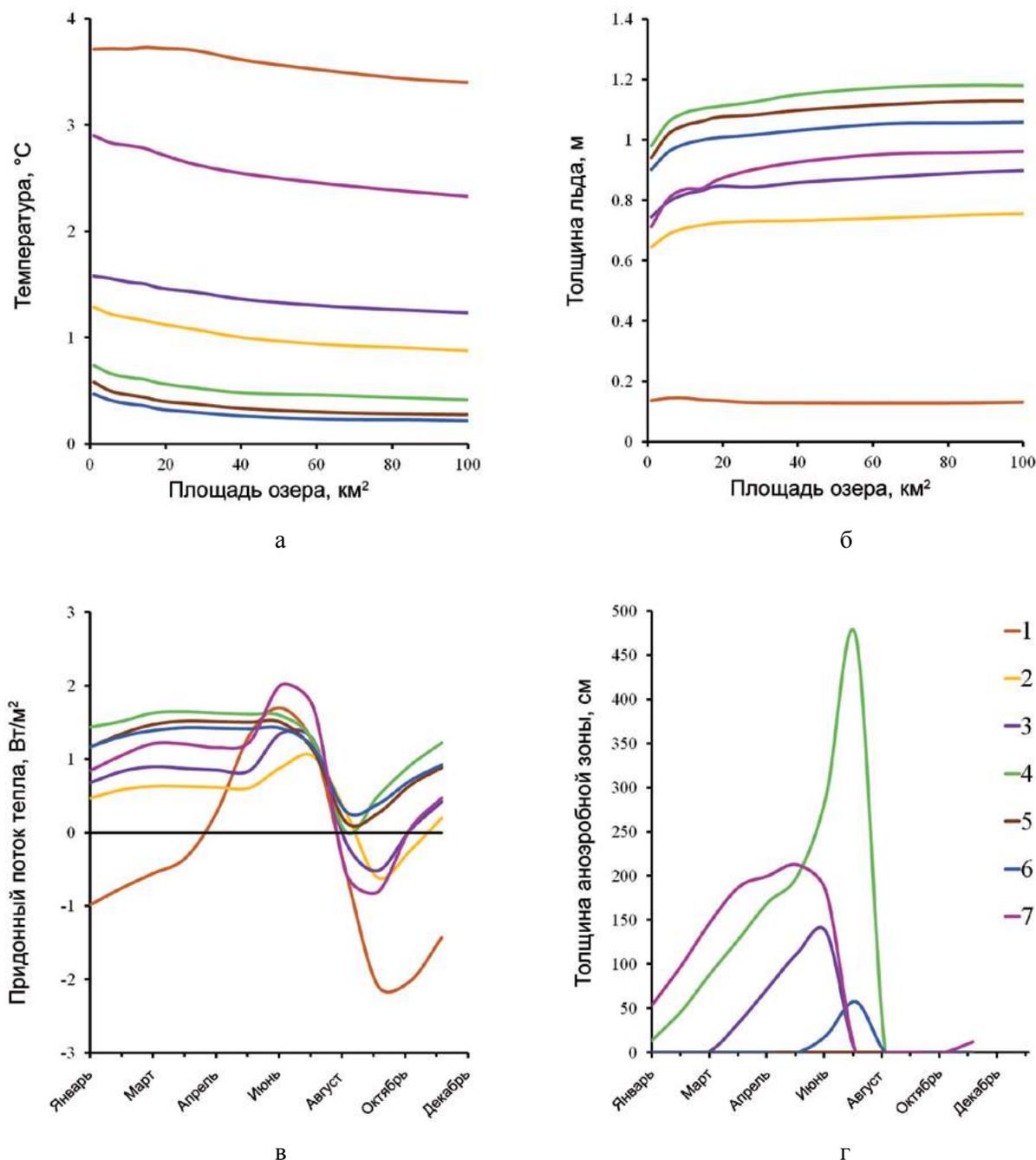


Рис. 7.14. Номограммы для приближенной оценки средних значений температуры поверхности воды (а), толщины льда (б) в зависимости от площади озера, теплообмен через границу вода-дно (в), а также внутригодовая динамика максимально возможной толщины анаэробной зоны (г) для различных зон тундры по результатам моделирования (номера зон соответствуют рис. 7.12)

Рис. 7.14в показывает результаты расчета внутригодовой динамики потока тепла через границу вода-дно для рассматриваемых точек. Нетрудно видеть, что в зонах 4, 5 и 6 поток тепла положителен, т.е. направлен в донные отложения в течение всего года, что объясняется влиянием вечной мерзлоты. В остальных зонах осенне-зимнее выхолаживание водной массы приводит к возникновению обратного потока тепла, так как донные отложения дольше удерживают тепло по сравнению с водной массой. В наибольшей степени это выражено в озерах Кольской тундры.

В качестве первого шага при переходе от вычисления термических параметров озер к решению задачи дистанционной оценки их экологического состояния может служить расчет характеристик кислородного режима и оценка перспектив возникновения анаэробных зон, формирующихся в усло-

виях острого дефицита растворенного в воде кислорода. В этих зонах активизируются восстановительные процессы, приводящие к образованию метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3), которые не только ухудшают качество озерной водной массы, но и могут быть токсичными для гидробионтов (особенно это касается H_2S). Входной информацией для расчета характеристик кислородного режима является скорость потребления кислорода бактериями (БПК₅), задаваемая по известным литературным аналогам [Гидрофизические аспекты формирования..., 2010; Physical background of the development..., 2007]. На рис. 7.14г представлена рассчитанная внутригодовая динамика средней толщины анаэробной зоны для рассматриваемых точек и расположенных в них озер. Как показали проведенные расчеты, риск возникновения анаэробных зон наиболее вероятен в озерах зон № 3, 4, 5 и 6. Максимальная толщина анаэробной зоны характерна для Северо-Таймырской арктической тундры (зона № 4), характеризующейся максимальной толщиной ледяного покрова (рис. 7.14б). Для озер, находящихся в зонах № 1, 2 и 7, возможность формирования анаэробных зон не выявлена.

Основным результатом исследования является методика полностью дистанционной оценки характеристик термического и кислородного режимов неизученных озер серверных территорий. Основным инструментом для выполнения такого рода оценки служит одномерная математическая модель гидротермодинамики озера FLake в совокупности с имеющейся информацией метеорологического реанализа в изучаемом регионе и известными геостатистическими зависимостями средней глубиной озера от его площади. Даже при отсутствии доступа к модели любой водопользователь, заинтересовавшийся озером с известными географическими координатами и оценивший площадь его поверхности, может на основании полученных в результате моделирования номограмм составить приближенную оценку термических характеристик водоема (продолжительность ледостава, толщина льда, температура поверхностного слоя воды и донных отложений, наличие или отсутствие бескислородной зоны и др.), а также характеристик кислородного режима.

Глава 8

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН

Палеолимнология – наука, изучающая время, условия возникновения и развития озер, изменения их режима под влиянием природных и антропогенных факторов, смены ассоциаций животных и растительных организмов на протяжении времени существования водоемов. Донные отложения озер являются одним из важных компонентов озерных экосистем. В них накоплена наиболее полная информация об истории развития водоемов, их продукционно-биологических и физико-химических процессах, протекающих в озерах, в том числе реакций на изменения климата и других природных факторов. Палеолимнология находится на стыке наук: географии, геологии, гидрологии, биологии, палеонтологии, палеоэкологии, палеоклиматологии.

Одним из приоритетных направлений, созданных в 1944 г. в Лаборатории озераведения, было палеолимнологическое. В основные задачи исследований Лаборатории входило изучение происхождения и истории развития озер. В настоящее время палеолимнологи ИНОЗ РАН продолжают развивать классические палеолимнологические методы на современном научном уровне, разрабатывают новые авторские подходы и методики.

Первая в России палеолимнологическая лаборатория основана в 1959 г. Гербертом Генриховичем Мартинсоном (1911–1997) (рис. 8.1а) в пос. Лиственничное Иркутской области при Лимнологическом институте СО АН СССР, что можно считать началом палеолимнологии как академической науки в нашей стране [Сапелко, Субетто, 2020]. В первые десятилетия в Лаборатории озераведения изучением донных отложений занималась группа сотрудников под руководством Николая Ивановича Семеновича (1907–1972). В 1956 г. Н.И. Семенович (рис. 8.1б) возглавил первую Ладожскую комплексную экспедицию, в задачи которой входило и изучение донных отложений. На основании сборов образцов донных отложений на 618 станциях по всей акватории озера были составлены схемы распределения различных типов донных отложений, особенностей гранулометрического состава, схемы распределения по площади дна углекислоты, серы, азота, фосфора, макро- и микроэлементов [Семенович, 1966]. Впервые сделаны заключения об особенностях осадконакопления в Ладожском озере, предпринята попытка районирования поверхностного слоя донных отложений по диатомовым водорослям [Давыдова, 1961] и биостратиграфического расчленения донных отложений по данным спорово-пыльцевому и диатомовому анализам [Абрамова, Давыдова, 1966; Абрамова, Давыдова, Квасов, 1967].



Рис. 8.1. Герберт Генрихович Мартинсон (а), Николай Иванович Семенович (б), Дмитрий Дмитриевич Квасов (в)

История последующих палеолимнологических исследований, продолжающихся до сих пор, описана в работе [История и методика палеолимнологических..., 2021]. К 1972 г. в ИНОЗ РАН был создан Сектор палеолимнологии под руководством Г.Г. Мартинсона, где сложился уникальный кол-

лектив ученых – лимнологов, геологов, палеонтологов (специалистов по различным группам ископаемых организмов – моллюскам, остракодам, харовым и диатомовым водорослям, спорово-пыльцевому анализу), литологов и геоморфологов. В разные годы здесь работали выдающиеся специалисты д.г.н. Дмитрий Дмитриевич Квасов, д.б.н. Наталья Наумовна Давыдова, к.г.н. Борис Иванович Кошечкин, к.г.н. Борис Георгиевич Венус, к.г.-м.н. Владимир Федорович Шувалов, д.г.н. Валентина Ивановна Хомутова, к.г.-м.н. Надежда Васильевна Толстикова, к.г.-м.н. Нина Петровна Ромашкина, к.г.-м.н. Ирина Юрьевна Неуструева, к.г.н. Галина Николаевна Бердовская, к.г.н. Ирина Вадимовна Делюсина, д.г.н. Дмитрий Викторович Севастьянов, д.г.н. Александр Николаевич Егоров, д.г.н. Дмитрий Александрович Субетто и другие (рис. 8.2). Как пример востребованности результатов выполненных исследований можно привести широко цитируемые вплоть до настоящего времени монографии Д.Д. Квасова [1975] и Н.Н. Давыдовой [1985], являющиеся основой палеолимнологических исследований в России.



Рис. 8.2. Санкт-Петербург, ИНОЗ, группа палеолимнологии, 1989 г. Слева направо: Дмитрий Александрович Субетто, Валентина Ивановна Хомутова, Марина Вячеславовна Пушенко, Татьяна Валентиновна Сапелко, Наталья Наумовна Давыдова, Ирина Юрьевна Неуструева, Борис Иванович Кошечкин, Владимир Федорович Шувалов, Герберт Генрихович Мартинсон

Палеолимнологические исследования проводились на озерах всей территории СССР, на таких, как Ладожское, Онежское, Псковско-Чудское, Балхаш, Иссык-Куль, Зайсан, на горных озерах Памира и Тянь-Шаня, озерах Заповедника «Боровое», озерах Урала, на малых озерах Латгалии, Карелии, Карельского перешейка и других озерах. В 1965–1995 гг. с интервалом в 2–3 года проводились Всесоюзные симпозиумы по истории озер, в которых принимали участие ведущие лимнологи и палеолимнологи СССР. Результатом этих работ явилось издание монографической серии «История озер» в 8 томах (1986–1998) (рис. 8.3), инициаторами которой выступили Г.Г. Мартинсон и Дмитрий Дмитриевич Квасов (1932–1989) (рис. 8.1в). Работа над серией осуществлялась силами коллектива палеолимнологов, с привлечением специалистов из разных научных учреждений нашей страны. Данное издание, подводящее итог палеолимнологических исследований XX века, до сих пор остается уникальным в этой области [Неуструева, Сапелко, 2017].

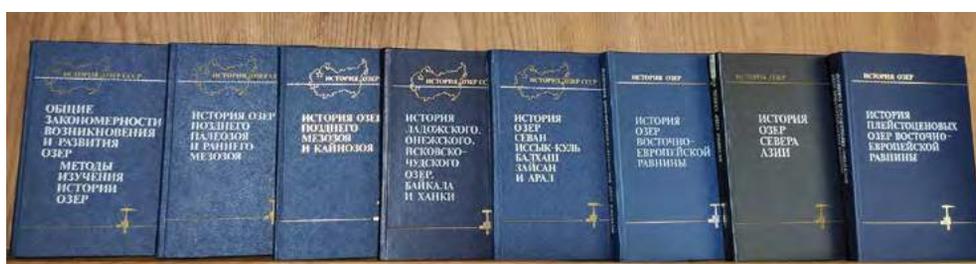


Рис. 8.3. Серия монографий «История озер»

С конца XX века коллектив палеолимнологов под руководством Н.Н. Давыдовой и Д.А. Субетто, несмотря на трудности с финансированием, продолжает работы по изучению истории больших и малых озер от Баренцева моря до Черного и от Чудского озера до Уральских озер. В рамках проектов и грантов, совместных с другими организациями, изучаются озера Арктики и Субарктики, Сибири, Крыма и Кавказа. Разрабатываются новые междисциплинарные темы по изучению истории озер на стыке наук.

Основной состав группы в последние 17 лет включает в себя к.г.н. Татьяну Валентиновну Сапелко (руководитель группы палеолимнологии), к.г.н. Дениса Дмитриевича Кузнецова и к.г.н. Анну Валерьевну Лудикову (рис. 8.4). Несмотря на небольшой основной коллектив группы, палеолимнологические темы НИР и гранты включают в себя значительное количество сотрудников за счет привлечения к комплексным палеолимнологическим исследованиям специалистов из других подразделений ИНОЗ РАН: гидрохимиков (к.г.н. Н.В. Игнатьева, М.А. Гусева, Н.В. Надеждина и др.), гидробиологов (Л.А. Кудерский, А.Г. Русанов) и гидрологов (М.А. Науменко, В.В. Гузи-ватый, С.Г. Каретников, А.Е. Лапенков), а также специалистов из других организаций. В последние годы приходят и активно работают молодые специалисты Н.Ю. Корнеенкова, М.А. Гусева, А.В. Терехов, Т.Ю. Газизова, А.В. Ревунова. Студенты и аспиранты Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена (РГПУ им. А.И. Герцена), Российского гидрометеорологического университета (РГГМУ) проходят полевые и производственные практики, стажировки и обучение палеолимнологическим методам. Долгие годы проводятся совместные исследования с археологами (Институт истории материальной культуры РАН, Кунсткамера и др.) [Реконструкция среды обитания..., 2008; Сапелко, Гусенцова, Кузнецов, Лудикова, 2012; История озера Канозеро..., 2022; Sapelko, 2012; Human-environment interaction..., 2020 и др.]. Ведется активное сотрудничество с ведущими исследователями России, а также стран ближнего и дальнего зарубежья. Палеолимнологи работают по российским и международным проектам. Некоторые результаты исследований группы палеолимнологии ИНОЗ РАН вошли в обзор палеолимнологических исследований России [Палеолимнологические исследования в российской..., 2017].

В 1976 г. Г.Г. Мартинсон сформировал Палеолимнологическую комиссию в Географическом обществе СССР (ныне Русское Географическое Общество), председателем которой он оставался до своей кончины. Секретарём комиссии являлась Н.В. Толстикова. Позже комиссию возглавила Н.Н. Давыдова, а секретарем стала И.Ю. Неуструева. С 2004 г. председателем комиссии стал Д.А. Субетто, а секретарем – Т.В. Сапелко. Со дня своего основания и до сегодняшнего времени комиссия,



Рис. 8.4. Санкт-Петербург, ИНОЗ, группа палеолимнологии, 2003 г. Стоят слева направо: Анна Валерьевна Лудикова, Денис Дмитриевич Кузнецов, Татьяна Валентиновна Сапелко; сидят слева направо: Наталья Наумовна Давыдова, Дмитрий Александрович Субетто, Ирина Юрьевна Неуструева

которую все это время возглавляли палеолимнологи Института озероведения, проводит свою работу постоянно, регулярно проходят заседания, организуются совещания и конференции разного уровня [Палеолимнологическая комиссия...]. За годы работы комиссии каждые три года проводились Всесоюзные симпозиумы по истории озер. С 2014 г., практически после двадцатилетнего перерыва, восстановлена традиция проведения Палеолимнологических конференций, которая вышла на международный уровень. Руководитель группы палеолимнологии Т.В. Сапелко с 2014 г. является членом оргкомитета этих конференций, а все участники группы – их постоянными участниками.

Несмотря на длительную историю изучения колонок донных отложений

Ладожского озера (начиная с 1959 г.) с применением литологического, геохимического, палинологического, диатомового, палеомагнитного и других видов анализа, комплексные палеолимнологические исследования донных отложений Ладоги актуальны до сих пор. Усовершенствование разработанных ранее методов и создание новых позволяет решать научные задачи на новом уровне [Субетто, 2009; Кудерский, Сапелко, Субетто, 2013]. Так, в 2019 г. [Holocene sedimentation in the central..., 2019] впервые для непрерывных последовательностей донных отложений Ладожского озера вместе с палиностратиграфией получены серии радиоуглеродных дат (AMS). До этого возраст донных отложений всех отобранных колонок озера устанавливался, как правило, с помощью палинологического анализа [Correlating paleolimnological results..., 2022]. Установлено, что в периоды позднего плейстоцена и голоцена скорость седиментации была разной и за последние 9000 кал. лет изменилась с 0,03 до 0,16 мм в год. Самая низкая скорость осадконакопления была рассчитана для современного периода. За последние 1300 лет сформировалось всего 3 см осадка. Около 1700 лет назад отмечено похолодание и снижение продуктивности озерной экосистемы. Одновременно с этим радиоуглеродные датировки (AMS) были получены в рамках российско-немецкого проекта PLOT (Paleolimnological Transect) еще для одной точки Ладожского озера [Vegetation and climate changes..., 2019], где помимо голоценового возраста отложений был получен датированный разрез позднемикулинских-ранневалдайских отложений [Environmental conditions in northwestern..., 2019]. Применение диатомового анализа позволило установить, что 118 тыс.–80 тыс. лет назад в ладожской котловине существовал пресноводный водоем, в формировании донных осадков которого большую роль играли процессы размыва и переотложения осадочного материала. Глубина водоема, конфигурация и условия осадконакопления в этот период существенно отличались от современных [Лудикова, 2019; The first dated preglacial..., 2021]. В настоящее время готовятся к печати материалы комплексных исследований с серией радиоуглеродных датировок (AMS) для еще двух колонок донных отложений Ладожского озера, отобранных в рамках экспедиционных исследований ИНОЗ РАН. Помимо радиоуглеродного (AMS), литологического, палинологического и диатомового анализов комплексные исследования включают анализы фосфора, металлов, органического вещества, гранулометрического состава колонок донных отложений [Сапелко, Игнатьева, Кузнецов, 2011]. При изучении донных отложений озера в настоящее время впервые для Ладожского озера выполнен ризоподный анализ, а также анализ ДНК с первыми предварительными результатами по исследованию микробных сообществ. Используются и новые современные методические подходы старых классических методов, таких как, например, использование непыльцевых палиноморф при палинологическом анализе [Новые подходы комплексных..., 2018], использование цист хризофитов (кремнистых микроостатков золотистых водорослей) при диатомовом анализе [Лудикова, 2019]. Исследования поздне- и послеледниковых осадков также позволили получить новые данные об эволюции палеобассейнов в ладожской котловине и основных закономерностях трансформации диатомовых комплексов в ходе развития экосистемы Ладожского озера [Лудикова, 2018; Holocene hydrological variability..., 2019; First Multy-Proxy Studies..., 2019; Ludikova, 2020]. Обнаружено отчетливое сходство в голоценовой динамике накопления органического вещества в колонках, отобранных на станциях, расположенных в различных частях Ладожского озера, что позволило выделить 5 периодов органического осадконакопления. В большинстве колонок донных отложений отмечено два периода повышенного накопления органического вещества – в среднем голоцене и в период, близкий к современности. Выявленные изменения содержания органического вещества зачастую литостратиграфически не выражены, что позволяет использовать данный подход для корреляции разрезов из разных частей озерной котловины [Кузнецов, Субетто, 2021].

Также совершенствуются разработанные ранее методы, такие, как комплексное изучение донных отложений малых озер, расположенных на разных абсолютных отметках и являвшихся на разных этапах своего развития частью Ладожского озера. Для реконструкции изменений уровня крупных пресноводных водоемов и эволюции гидросети Балтийско-Ладожского региона [Evolution of waterways and..., 2007; The Baltic Sea and Ladoga..., 2009; Holocene oscillations of the Baltic..., 2010] в палеолимнологических исследованиях широко используется метод изоляционных бассейнов. Под изоляционными бассейнами понимаются малые озера, котловины которых в прошлом входили в состав, а затем отделились от крупного водоема в ходе регрессии береговой линии, обусловленной гляциоизостатическими, эвстатическими и тектоническими процессами. Важным направлением изучения изоляционных бассейнов является выявление «сигналов» изоляции малого водоема от крупного морского или

пресноводного бассейна на основе литологических и микропалеонтологических данных. Изоляционные процессы сопровождаются изменениями гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров водной среды, что находит отражение в изменениях вещественного состава донных отложений, видового состава диатомовых водорослей, а также численности таких кремнистых микрофоссилий, как цисты золотистых водорослей и спикулы губок [Лудикова, 2018; Ludikova, Subetto, Kuznetsov, Sapelko, 2021]. Выявление и уточнение индикаторной роли различных групп микрофоссилий позволяет более детально реконструировать ход процесса изоляции, устанавливать реакцию различных компонентов водной среды и биоты на смену морских условий пресноводными (или условий крупного пресноводного бассейна обстановками малого водоема), определять скорость изоляционного процесса, его специфику и сходные черты для разновозрастных объектов. Лито- и биостратиграфические исследования донных отложений таких озер позволяют надежно выделить осадочный горизонт, соответствующий изоляции (рис. 8.5). Его датирование позволяет установить время, когда уровень крупного бассейна опустился ниже высотной отметки малого водоема.

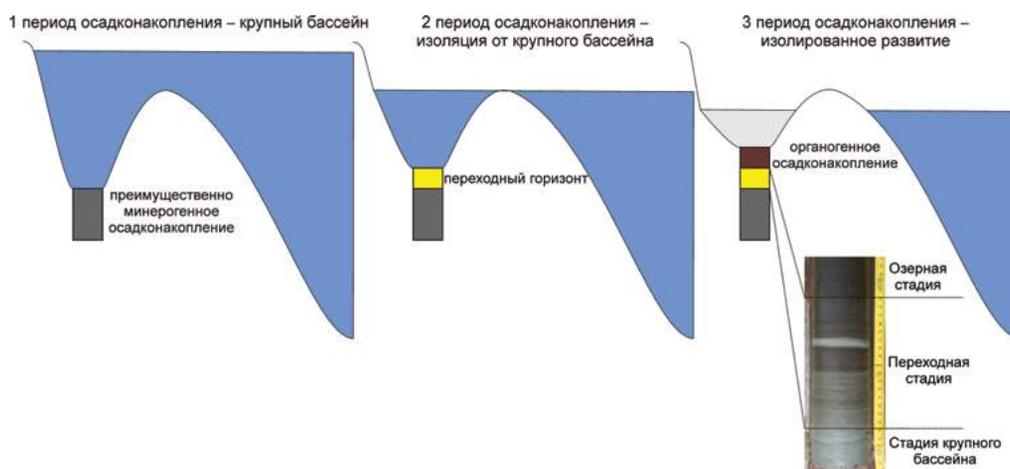


Рис. 8.5. Схема процесса отделения изоляционных бассейнов [Хроно- и литостратиграфия озерных..., 2022]

Актуальность подобных исследований вызвана необходимостью уточнения и расширения представлений об эволюции геосистем морских и крупных пресноводных бассейнов в поздне- и послеледниковое время и изменении природных обстановок их прибрежных территорий в связи с перемещением береговой линии. В частности, продолжают уточняться пространственные и хронологические пределы среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера и связанных с ней перестроек системы стока этого крупного бассейна [Колебания уровня Ладожского..., 2005; Кузнецов, Субетто, Сапелко, Лудикова, 2019; Кузнецов, Субетто, 2019]. Выделение группы видов диатомовых водорослей – индикаторов трансгрессии [Лудикова, 2015a], позволило более надежно выявлять свидетельства проникновения ладожских вод в котловины малых водоемов и затопления ими прибрежных низменностей [Ладожская трансгрессия и ландшафты..., 2019; Human-environment interaction..., 2020; Кузнецов, Субетто, Лудикова, 2022].

Как показали многолетние исследования на островах северной части Ладожского озера наиболее перспективными для изучения динамики уровня Ладоги являются островные озера. Уникальность расположения внутренних водоемов острова на небольшом расстоянии друг от друга, и при этом на разных высотных отметках, дает возможность восстановить их период изоляции и, соответственно, изменение уровня Ладожского озера. Подобные работы в настоящее время ведутся на островах северной части Ладожского озера: Путсаари, Лункулансаари, Валаам [Колебания уровня Ладожского..., 2005; Палеолимнология внутренних озер..., 2014; The development of island lakes..., 2020]. Новые направления изучения истории Ладожского озера в последнее время также включают в себя историю заболачивания на примере островных озер [Сапелко, Корнеевкова, 2017; Корнеевкова, 2021], картирование этапов развития Ладожского озера в голоцене [Терехов, Сапелко, 2016; Сапелко, Терехов, Амантов, 2018], изучение растительных остатков [Палеолимнология внутренних озер..., 2014] и пыльцы [Газиова, Сапелко, 2020] макрофитов для реконструкции процесса отделения озер.

По имеющимся данным для периода Ладожской трансгрессии (последние 3 тысячи лет) построена серия карт изменения береговой линии северной части Ладожского озера для трех временных срезов (рис. 8.6–8.8). В последние годы исследования проводились как на акватории современного Ладожского озера, так и на его берегах, которые в результате изменения уровня Ладоги на разных этапах голоцена были частью озера или его береговой зоной. Так, исследования археологических памятников, расположенных на берегах Ладоги на разных стадиях своего развития в течение голоцена, также позволили установить границы распространения древнего Ладожского озера [Реконструкция среды обитания..., 2008; Ладожская трансгрессия и ландшафты..., 2019; Новые данные относительно..., 2009; Human-environment interaction..., 2020], а также удревнить начало антропогенного воздействия на побережье Ладожского озера [Сапелко, 2021].

Помимо Ладожского озера метод изоляционных бассейнов применялся для реконструкции изменений уровня Онежского озера в позднелисьдниковое время [Лудикова, Кузнецов, 2018]. На Онежском озере также выполнено изучение состава и структуры диатомовых комплексов из осадочного материала седиментационных ловушек [Contemporary Sedimentation in Lake..., 2023; Лудикова, 2023].

Метод изоляционных бассейнов применяется также для озер, отделяющихся от морских бассейнов. Подобные работы проводятся на Балтийском и Белом морях. Так, в последнее время изучен ряд изоляционных бассейнов на о. Гогланд и побережье Финского залива Балтийского моря [Радиоуглеродное датирование в междисциплинарных..., 2020]. Палеолимнологические исследования малых озер северо-западного побережья Финского залива выявили свидетельства проникновения в их котловины вод раннеголоценовой анциловой трансгрессии Балтики и лишь косвенные «сигналы» среднеголоценовой литориновой трансгрессии. Это позволило получить новую информацию о пространственно-временных рамках данных трансгрессивных стадий в регионе [Реконструкция палеоэкологических условий..., 2021].

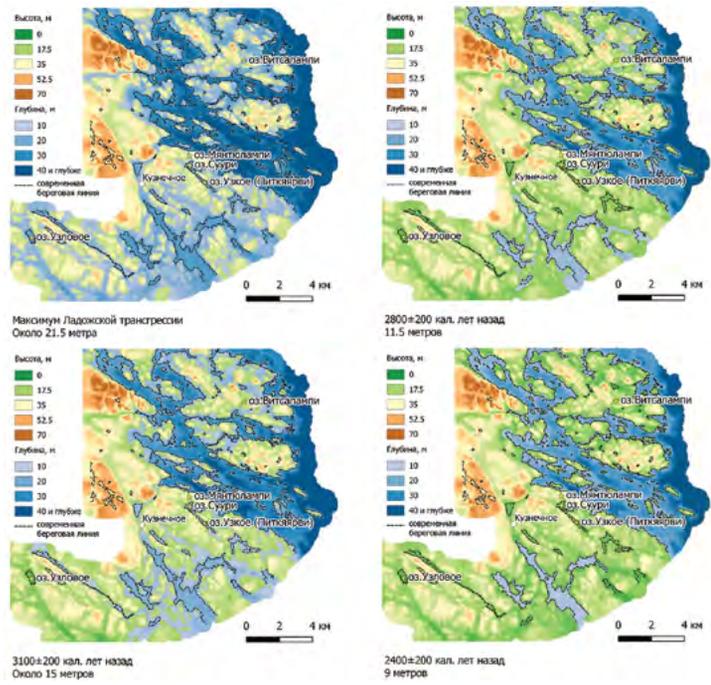


Рис. 8.6. Изменения береговой линии Ладожского озера в районе пос. Кузнецкое [Терехов, Сапелко, 2016; Сапелко, Терехов, Амантов, 2018]

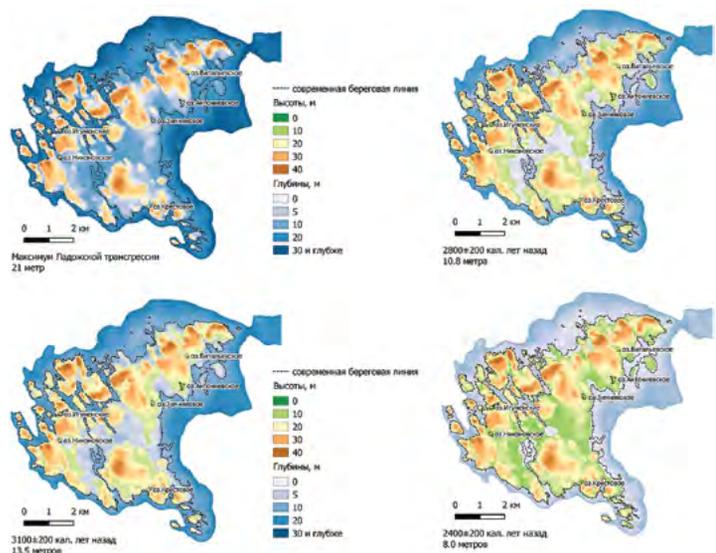


Рис. 8.7. Изменения береговой линии Ладожского озера в районе острова Валаам [Терехов, Сапелко, 2016; Сапелко, Терехов, Амантов, 2018]

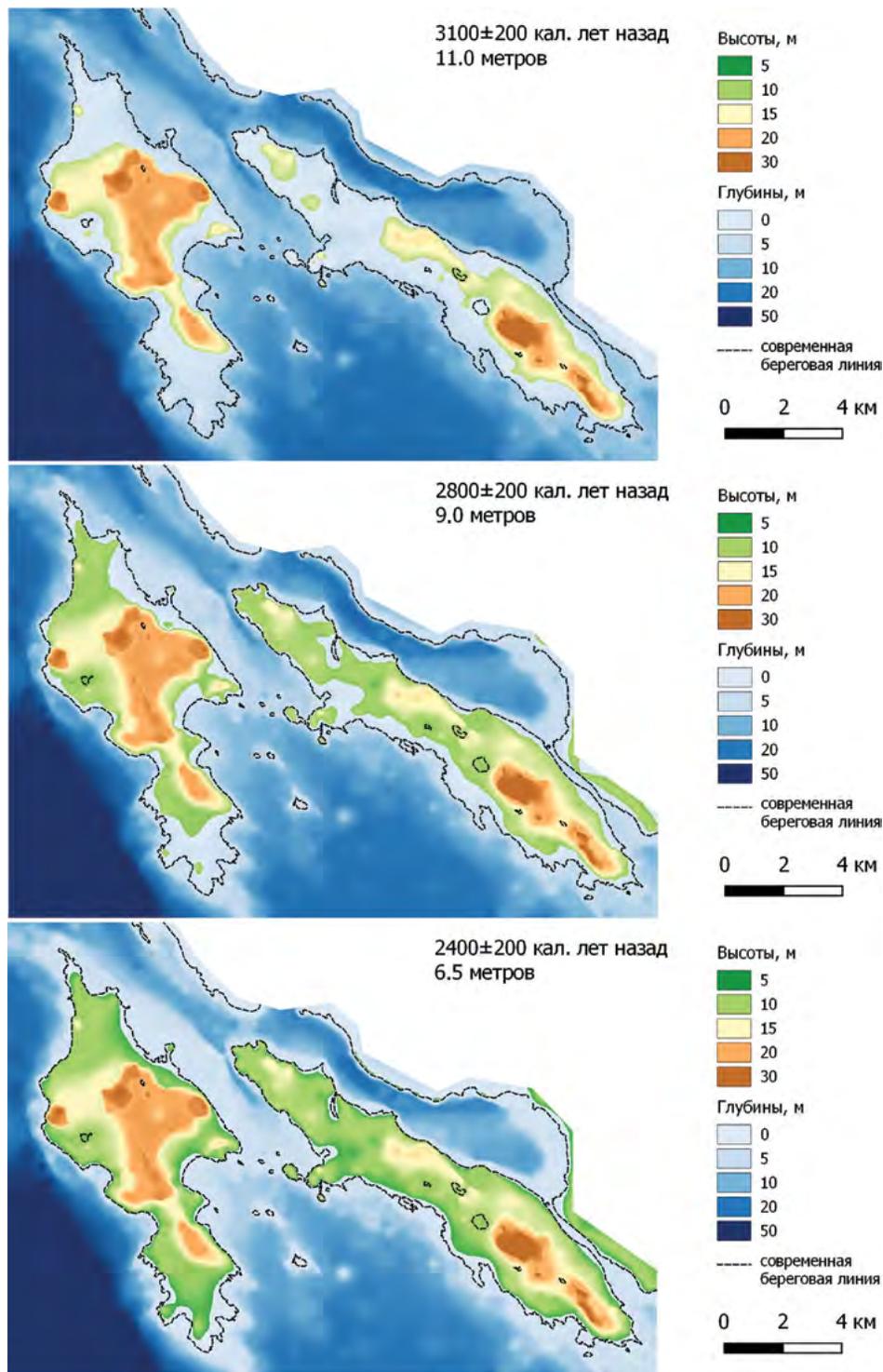


Рис. 8.8. Изменения береговой линии Ладожского озера в районе о. Мантсинсаари и о. Лункулансаари [Терехов, Сапелко, 2016; Сапелко, Терехов, Амантов, 2018]

Палеолимнологические исследования изоляционных бассейнов, выполненные на островах Соловецкого архипелага (Большой Соловецкий и Анзер), позволили реконструировать изменения относительного уровня моря в данном секторе беломорского бассейна в течение голоценового периода [Хронология изоляции озер..., 2012; Хроно- и литостратиграфия озерных..., 2022]. Было установлено время начала озерного осадконакопления в котловинах озер Соловецкого архипелага, а также скорость осадконакопления в отделившихся от моря озерах, расположенных на отметках до 35 м

над уровнем моря, рассчитана скорость вертикального отступления береговой линии моря, уточнено положение верхней морской границы на данной территории. Реконструкция динамики растительности в течение голоцена по колонкам и поверхностным пробам донных отложений озер позволили уточнить хронологические границы динамики озерных экосистем и особенности изменения климата на островах Соловецкого архипелага [Сапелко, Терехов, Субетто, 2017]. Изучение динамики содержания органического веществ, изменений состава и содержания различных групп кремнистых микрофоссилий позволило выявить лито- и биоиндикационные признаки изоляционных процессов [Хроно- и литостратиграфия озерных..., 2022; Ludikova, Subetto, Kuznetsov, Sapelko, 2023]. На Белом море проводятся комплексные исследования с участием ИНОЗ РАН также изоляционных бассейнов Онежского полуострова Белого моря [Репкина, Романенко, Лудикова, 2020; Реконструкция относительного перемещения..., 2022]. Помимо этого, на Белом море также проводились работы на юго-западном побережье Кольского полуострова. Палеолимнологические исследования на крупных изоляционных бассейнах – озерах Колвицк, Канозере и других дали возможность уточнить время и особенности дегляциации региона [Sapelko, 2017], период установления морского осадконакопления в беломорской котловине, а также положение верхней морской границы для данного участка побережья [Лудикова, Греков 2017; Сапелко, Колька, Евзеров, 2015; История озера Канозеро..., 2022; Lake sediments of the Kindo..., 2022; Ludikova, Sapelko, Kuznetsov, 2022]. Совместные палеолимнологические и археологические исследования на оз. Канозеро позволили выявить влияние озерного водного пути на расселение человека в регионе [Сапелко, Колпаков, 2011]. На севере Кольского полуострова изучались озерные и болотные отложения побережья Баренцева моря [Сапелко, Анисимов, Носевич, 2016; Сапелко, Анисимов, 2021].

Донные отложения озер, как источник информации об истории озер различных регионов Восточно-Европейской равнины и прилегающих территорий, изучались также в Карелии [Сапелко, Севастьянов, 2001; Сапелко, 2002; 2006; Сапелко, Субетто, Севастьянов, 2006], на Онежско-Ладожском перешейке [Сапелко, Гусенцова, Кузнецов, Лудикова, 2012; Сапелко, Кузнецов, Плотникова, Кулькова, 2016], на Валдайской возвышенности [Davydova, Subetto, Khomutova, Sapelko, 2001; Climatic and environmental changes..., 2007; Голоценовая история озер..., 2021; Holocene history of the lake..., 2022] и в центральной части России [История озера Глубокое..., 2013; Назарова, Сапелко, Кузнецов, 2015; Distribution of benthic testate..., 2019]. Наряду с пресноводными озерами изучаются и соленые озера. Так, с 2005 г. изучаются озера Крымского полуострова [Субетто, Сапелко, Столба, 2007; Реконструкція палеогеографічних умов..., 2009; Палеолимнология озер Западного Крыма, 2023]. Расселение человека на полуострове в древности тесно переплетается с историей озер, поэтому здесь ведутся междисциплинарные исследования совместно с археологическими [Stolba, Subetto, Sapelko, 2012]. В 2018 г. в рамках российско-армянского гранта РФФИ «Палеолимнологический аспект изучения эволюции экосистем высокогорных озер России и Армении» начаты исследования высокогорных озер Кавказа. Исследования также носят междисциплинарный характер и включают в себя палеолимнологические, геоморфологические, гидрологические, геоботанические и другие исследования [Севастьянов, Сапелко, Науменко, Бойнагрян, 2021; First Multy-Proxy Studies..., 2019]. История озер в высокогорье на территории Армении изучается впервые [Бойнагрян, Сапелко, Габриелян, Севастьянов, 2018].

Среди причин, влияющих на изменения озерных экосистем, выделяются природные и антропогенные. По колонкам донных отложений многочисленных изученных озер сделаны заключения по изменению климата в позднем плейстоцене и голоцене. В том числе выполнены обобщения по климатическим колебаниям Балтийского региона [Борзенкова, Борисова, Жильцова, Сапелко, 2017; Climate Change During..., 2015].

С точки зрения антропогенного воздействия много лет изучаются городские водоемы. Комплексные палеолимнологические исследования колонок донных отложений природных водоемов, расположенных в городской черте, позволили выявить свидетельства начала и усиления антропогенного воздействия по мере заселения и хозяйственного освоения территории [Лудикова, 2008; Гусева, Кузнецов, Сапелко, 2018; Методические подходы к определению..., 2018]. Изучаются озера Нижнее, Среднее и Верхнее Суздальские на территории г. Санкт-Петербурга, озера Всеволожского района Ленинградской области. Так, по донным отложениям оз. Шведского получена древняя и современная история развития городского водоема в течение 10 тысячи лет и установлено естествен-

ное происхождение водоемов, ранее считавшимися искусственными. Установленные длительные периоды перерывов осадконакопления связаны с активной деятельностью человека. Также с целью изучения современного состояния городских водоемов выполнено исследование состава диатомовых комплексов из поверхностного слоя донных отложений 53 водных объектов г. Санкт-Петербурга (естественных и искусственных). Выявлены наиболее характерные таксоны диатомей, установлены закономерности распространения в городских водоемах основных видов и экологических групп диатомей, выделенных по отношению к активной реакции среды, трофности и сапробности. Показано, что преобладание эвтрофных и гиперэвтрофных диатомей, высокое относительное содержание алкалифилов и алкалибионтов, а также видов-индикаторов повышенной сапробности, закономерно отражает основную характеристику большинства исследованных объектов – высокую трофность, выраженную через содержание общего фосфора [Лудикова, 2016]. Применение методов многомерной статистики позволило выделить наиболее значимые факторы, определяющие особенности состава диатомовых комплексов, к которым, помимо содержания общего фосфора, относятся удельная электропроводность и глубина водоема [Лудикова, 2015б]. Кроме того, отмечена пространственная закономерность распространения видов-индикаторов трофности и сапробности в водоемах г. Санкт-Петербурга. Эта закономерность во многом отражает особенности состава четвертичных отложений, вмещающих котловины изученных объектов, которые влияют на природный фон содержания биогенных элементов в их водах. Установлено, что, несмотря на определенные закономерности распределения видов, особенности состава диатомовых комплексов водоемов г. Санкт-Петербурга в значительной степени обусловлены локальной спецификой каждого водного объекта [Лудикова, 2014].

Новые методы и подходы: Тэфхронология. Впервые на территории России [Wastegard, Wohlfarth, Subetto, Sapelko, 2000] в донных отложениях озер Медведевского [Первые находки вулканического..., 2001] и Пасторского на Центральной возвышенности Карельского перешейка были обнаружены прослой криптотефры (микрочастиц вулканического пепла) Ведде [Первые находки вулканического..., 2001; Климат Северо-Запада России..., 2003; Climate and environment on..., 2002]. Пепел исландского происхождения (12000 кал. лет назад) был обнаружен во многих разрезах в Гренландии, Северной Атлантике и Европе, в Альпах и т.д., что делает его важным стратиграфическим репером для изучения позднеледниковых отложений. Пепел исландского вулкана в двух озерах Карельского перешейка был самым восточным заносом этого пепла, обнаруженным на тот момент [Кузнецов, Субетто, 2004].

Методика разделения влияния антропогенных и природных факторов на экосистему озер по палеолимнологическим данным. В рамках комплексных исследований колонок донных отложений озер разработана методика разделения влияния антропогенных и природных факторов на экосистему озер по палеолимнологическим данным [Сапелко, 2018]. Получены результаты, позволяющие выявить начало раннего антропогенного воздействия на озерные экосистемы и оценить динамику антропогенной и климатической составляющих на протяжении длительного временного интервала на основании палеолимнологических данных [Климатические и антропогенные факторы..., 2015]. В результате апробирования авторской методики разделения влияния антропогенных и природных факторов на экосистему озер по палеолимнологическим данным, на протяжении голоценового периода получена оценка динамики экологического состояния малых озер, расположенных в разнотипных ландшафтах с разной степенью антропогенной нагрузки (рис. 8.9). Получены результаты, позволяющие выявить начало раннего антропогенного воздействия на озерные экосистемы и оценить динамику антропогенной и климатической составляющей на протяжении длительного временного интервала на основании палеолимнологических данных. Для статистических расчётов изменений концентрации металлов, форм фосфора и органического вещества в колонках донных отложений была разработана программа «Расчет статистически значимых изменений осадконакопления в индустриальный период». Она написана на языке Python версии 2.7 и упакована в исполняемый exe-файл, содержащий интерпретатор и необходимые для работы библиотеки. Программа использована для статистических расчётов металлов, органического вещества и фосфора в колонках донных отложений Суздальских озер [Методические подходы к определению..., 2018] и Ладожского озера. На программу получен патент (№ 2018614971).

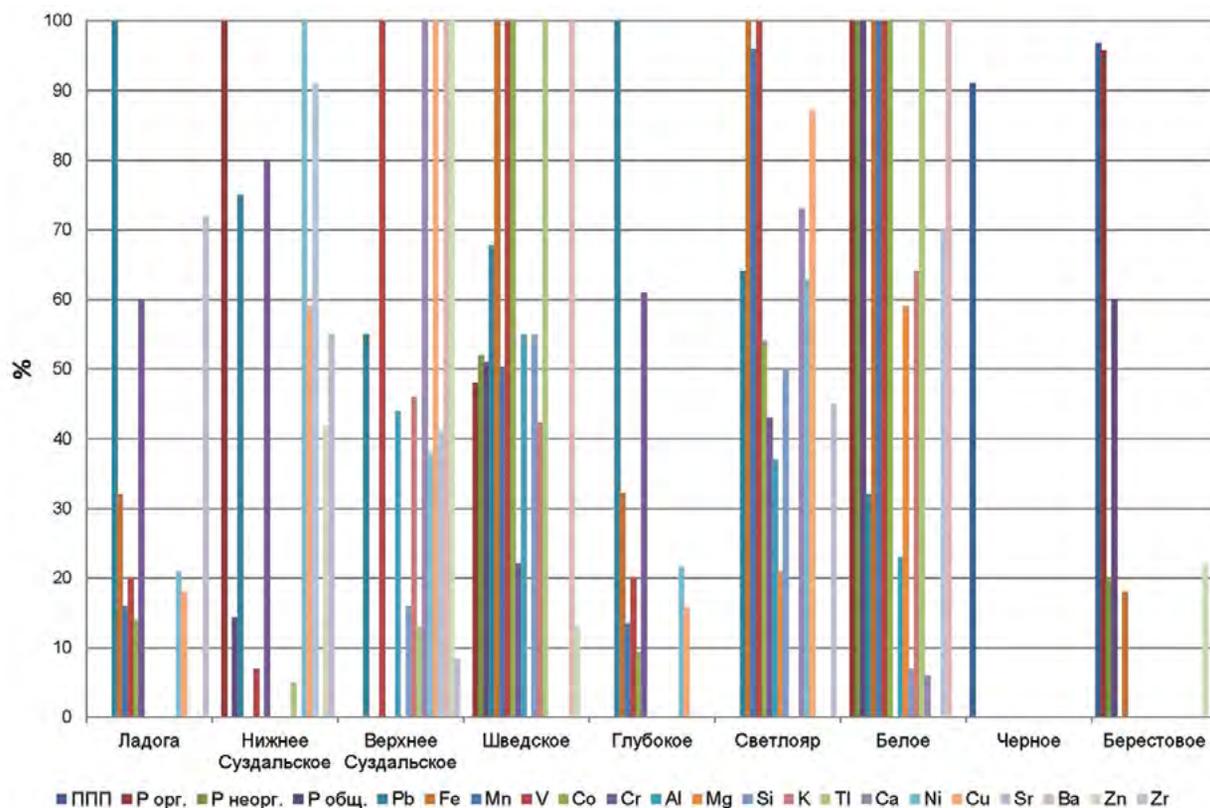


Рис. 8.9. Пример расчетов для индустриального периода влияния (в %) антропогенного воздействия на накопление в изученных озерах органического вещества (ППП), органического фосфора ($P_{орг.}$), неорганического фосфора ($P_{неорг.}$), общего фосфора ($P_{общ.}$) и металлов

Использование цист золотистых водорослей в диатомовом анализе. Помимо анализа створок диатомовых водорослей, традиционного метода реконструкции основных этапов эволюции озерных экосистем, в настоящее время в палеолимнологических исследованиях ИНОЗ РАН используется и другая индикаторная группа микрофоссилий – цисты золотистых водорослей (*Chrysophyceae*). В отложениях крупных озер – Ладожского и Онежского, – цисты золотистых водорослей являются второй по численности группой кремнистых микрофоссилий, тогда как в осадках малых озер их содержание может превышать содержание створок диатомей. Индикационный потенциал этой группы микрофоссилий для палеореконовструкций представляется достаточно значимым. В рамках текущих исследований впервые получены данные об относительном и абсолютном содержании цист золотистых водорослей в колонках донных отложений Ладожского и Онежского озер. Предпринята попытка совместной интерпретации этих данных и результатов диатомового анализа в контексте изменений продолжительности гидрологических и гидробиологических сезонов и изменений уровня этих водоемов [Ludikova, 2020; Лудикова, Кузнецов, 2021; Ludikova, Sapelko, Kuznetsov, 2022]. Исследования современных донных отложений Онежского озера [Лудикова, 2023] позволили предположить, что высокое содержание цист в некоторых районах озера отражает высокую продуктивность живых сообществ золотистых водорослей, установленную по данным гидробиологических исследований. В настоящее время начаты работы по видовой идентификации цист золотистых водорослей.

Использование непыльцевых палиноморф в палинологическом анализе. В последнее время все больше значения палинологи придают определению различных непыльцевых палиноморф. Несомненно, это повышает информативность палинологического анализа. Определения непыльцевых палиноморф оказались очень информативны для озерных отложений [Nonpollen palynomorphs..., 2011]. Наиболее часто встречаются такие непыльцевые палиноморфы, как микрочастицы углей, клетки устьиц растений, фитолиты (кремниевые частицы, формирующиеся в тканях растений),

водоросли, споры грибов, остатки микрофауны и др. Так, например, находки микрочастиц углей могут свидетельствовать о пожарах, а увеличение количества спор грибов – о выпасе животных на водосборе озера. Использование непыльцевых палиноморф расширяет возможности спорово-пыльцевого анализа и помогает уточнить выводы, сделанные по изучению пыльцы растений. Объединяя различные экологические группы, мы получаем более полное представление об этапах развития озера, изменении его экологии, уровня и еще много другой информации в зависимости от состава непыльцевых палиноморф и задач исследования [Новые подходы комплексных..., 2018].

Расчет климатических характеристик по палинологическому и хирономидному анализам.

Источником информации о развитии палеоклимата являются природные архивы, среди которых наиболее перспективными являются донные отложения озер. В связи с этим особенно востребованы в настоящее время палеоклиматические исследования, направленные на количественную реконструкцию палеоклиматических характеристик. Основными методами, используемыми для этих целей, являются палинологический и хирономидный. В своих палеолимнологических исследованиях мы применяем оба метода. Так, с помощью палинологических данных мы получили количественные характеристики палеоклимата для Карельского перешейка и Соловецких островов [Сапелко, Терехов, Субетто, 2017]. Количественные климатические характеристики с помощью хирономидного анализа мы получили для оз. Глубокого в центральной части России [Назарова, Сапелко, Кузнецов, Сырых, 2015]. При расчетах мы использовали имеющиеся мировые методики, однако, как показывают многочисленные результаты по различным регионам, в том числе и наши данные, все имеющиеся на сегодняшний день методики расчета палеоклиматических характеристик далеки от совершенства, однако дают хорошую перспективу развития и совершенствования методов. Накопленные палинологические данные колонок и поверхностных проб озерных отложений при наличии соответствующих специалистов в Институте озераведения позволят в дальнейшем разработать новую методику. Так, собранный на озерах Карельского перешейка массив данных по хирономидному анализу поверхностных проб озерных отложений [Chironomid-Based Modern Summer..., 2023] позволил разработать региональную методику для количественных реконструкций по хирономидному анализу.

Анализ остатков и пыльцы макрофитов для реконструкции этапов изоляции озер от более крупных водоемов (озер, морей). Использование ботанического анализа торфа с определением растительных макроостатков в озерных отложениях показало перспективы реконструкции по макрофитам не только процессов заболачивания и эвтрофирования озер [Палеолимнология внутренних озер..., 2014; Ладожская трансгрессия и ландшафты..., 2019; Корнеевкова, 2021], но и этапов изоляции малых озер от более крупных водоемов. Наши новые разработки показали перспективность использования для этих целей не только макроостатков, но и пыльцы макрофитов [Газилова, Сапелко, 2020]. Разработка нового подхода к исследованию изменения уровня водоемов выполняется на островных озерах Ладожского озера [Gazizova, Sapelko, Korneenkova, 2020; The development of island lakes..., 2020]. Помимо палеолимнологических исследований одновременно проводятся геоботанические работы на изучаемых озерах. Полученные данные об изменениях в таксономическом составе и обилии макрофитов позволили уточнить этапы развития изучаемых водоемов и проследить связь между трансгрессивно-регрессивными фазами развития Ладожского озера и динамикой водной растительности. В настоящее время исследования на островных озерах Ладоги продолжаются и начаты новые – на озерах Кургальского полуострова в рамках гранта РНФ «Реконструкция динамики макрофитов разнотипных озер Кургальского полуострова (современное состояние и голоценовая история)». Здесь пыльца макрофитов изучается как потенциальный источник информации для изменения уровня моря в процессе отделения озер Кургальского полуострова от Балтики.

Таким образом, несмотря на трудности, возникшие в последнее время и приостановившие многие из незавершенных исследований, группа палеолимнологии продолжает исследования, начатые нашими предшественниками, усовершенствуя старые методы и используя новые. Ежегодно продолжаются полевые работы на Ладожском озере и малых озерах разных регионов, для чего у коллектива есть все необходимое оборудование для отбора колонок и поверхностных проб донных отложений

как на больших глубоководных озерах, так и на малых озерах. Продолжает работать лаборатория для обработки образцов на спорово-пыльцевой и диатомовый анализы. Сотрудники выполняют литологический (с определением потерь при прокаливании), гранулометрический, палинологический, диатомовый анализы, а также ботанический анализ торфа, анализ металлов и фосфора в донных отложениях озер. Постоянно привлекаются специалисты по другим анализам из разных организаций. Разрабатываются новые методы, методики и подходы. В начале 2000-х годов группа палеолимнологии первой для европейской территории России использовала метод тефрохронологии в изучении истории озер. Разработана методика разделения влияния антропогенных и природных факторов на экосистему озер по палеолимнологическим данным, которая постоянно совершенствуется. В настоящее время разрабатывается новый подход к изучению изменения уровня озер и морей с использованием макроостатков и пыльцы макрофитов для реконструкции этапов изоляции озер от более крупных водоемов (озер, морей). Развиваются старые методы на новом уровне. Так, при палинологическом анализе, помимо пыльцы, изучаются непыльцевые палиноморфы; параллельно с диатомовым анализом изучаются цисты золотистых водорослей. Планируется продолжение работ по количественным реконструкциям палеоклимата.

Глава 9

РАБОТЫ В ОБЛАСТИ МЕТАБОЛОМИКИ ВОДНЫХ ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ОРГАНИЗМОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Метаболомику водных организмов можно определить, как науку, изучающую эндогенные и экзогенные метаболиты водных организмов для описания метаболизма свободноживущих водных организмов и характеристики окружающей их естественной среды, приводящей (наряду с влиянием генома и протеома) к формированию и изменению их метаболома. При этом не исключены исследования в лабораторных условиях, где могут быть симитированы сценарии, встречающиеся в естественной среде. Этот подход (как будет показано ниже) имеет значительный потенциал для характеристики и использования метаболических ответов водных организмов (например, водных макрофитов) на воздействие природных и антропогенных факторов (включая стрессоры) для характеристики состояния и изменения экологических условий в водоеме. Также данный подход показывает большие возможности для открытия новых биоактивных природных метаболитов, обладающих терапевтическим эффектом и другими полезными свойствами, которые могут быть использованы в различных областях научной и хозяйственной деятельности.

Следует отметить, что приоритет в исследовании низкомолекулярных органических соединений (НОС) – метаболитов водных организмов (прежде всего, макрофитов) связан с именем ученика профессора Бориса Петровича Токина, Гуревича Файвы Абрамовича (1918–1992). В 40-х годах XX века Ф.А. Гуревич впервые начал исследования фитонцидов водных и прибрежных растений. В докторской работе Ф.А. Гуревич показал, что фитонцидная активность водных растений тесным образом связана со стадией их развития, физиологическим состоянием, местом произрастания, сезонными, водными, климатическими и другими условиями [Гуревич, 1973]. Им же показано, что фитонциды являются очень значимым фактором распределения гидробионтов в водоеме, в том числе и беспозвоночных, например, моллюсков, репродуктивная деятельность которых теснейшим образом связана с фитонцидными свойствами произрастающих в водоеме макрофитов. К сожалению, на начальном этапе изучения НОС отсутствовала возможность их идентификации до химической формулы.

В дальнейшем прогресс в области водной метабомики в российской науке сошел на нет. Подобные исследования в отношении водных экосистем в России после распада СССР перестали получать должное внимание со стороны исследователей в основном по причине отсутствия необходимого аналитического и другого дорогостоящего оборудования, прежде всего хромато-масс-спектрометрических комплексов. Таким образом, к настоящему времени передовые позиции науки в этой области в РФ и на постсоветском пространстве утрачены.

Согласно проведенному анализу, по данным библиографической базы РИНЦ по водной метабомике ежегодно в нашей стране публикуются всего несколько статей. По аллелопатии в наземных местообитаниях с 2011 по 2022 гг. публиковалось от 20 до 30 статей в год. При этом, в мировой науке за это же время выходит от 30 до 70 статей в издании SPRINGER и от 25 до 75 работ в изданиях базы ScienceDirect. То есть, в настоящее время в мировой науке интенсивно развиваются исследования по метабомике водных организмов [Viant, 2007; Pomfret, Brua, Izral, Yates, 2020; Bayona, de Voogd, Choi, 2022], в том числе с использованием хромато-масс-спектрометрии. Наиболее высокими темпами идет развитие подобных исследований в отношении наземных растений, прежде всего имеющих пищевое, медицинское, фармакологическое значение и продуцентов эфирных масел. Подобных же работ в отношении водных растений в десятки раз меньше. Особенно мало работ по метабомике и хромато-масс-спектрометрии НОС у водных макрофитов. Хотя перспективы использования информации о НОС водных растений трудно переоценить для развития современной гидробиологии, биохимической экологии и других областей науки, связанных с изучением и рациональным использованием разнотипных пресноводных экосистем и биоресурсов. Только небольшое число макрофитов различных экологических форм (погруженные, плавающие, полупогруженные) достаточно

полно исследованы с точки зрения выявления состава их НОС и их роли в аллелохимических взаимодействиях [Hu, Hong, 2008; Kurashov, Krylova, Protoporova, 2021].

В последнем десятилетии XX века начаты изучения НОС фотосинтезирующих организмов в Институте озероведения РАН под руководством к.х.н. Николая Никитовича Коркишко (рис. 9.1). Это был первый этап развития метабомики фотосинтезирующих организмов с применением высокоэффективной газожидкостной хроматографии. В то время еще нельзя было проводить идентификацию НОС до химической формулы, но можно было выявить закономерности синтеза водорослями этих веществ и их распределение в Ладожском озере. Коркишко Н.Н. и Юлия Викторовна Крылова показали, что большинство содержащихся в водных массах Ладожского озера НОС являются метаболитами планктонных водорослей. Многие из этих соединений ранее ошибочно принимались за хлорорганические пестициды [Трансформация природных метаболитов..., 2000]. Также было показано, что целый ряд прижизненных метаболитов водорослей относятся к так называемым нефтяным углеводородам, а высокие концентрации последних в Ладожском озере связаны с интенсивным развитием фитопланктона. Благодаря высоким концентрациям этих метаболитов, в Ладожском озере могут образовываться при слабых ветрах области выглаженной воды, хорошо заметные из космоса, и не связанные с нефтяным загрязнением [Применение высокоэффективной газожидкостной..., 2001; Krylova, Kurashov, Korkishko, 2003; Роль метаболитов фитопланктона..., 2007]. В этих исследованиях также активно участвовали д.б.н. Евгений Александрович Курашов и фитопланктонолог Елена Викторовна Протопопова. Интересным результатом стало выявление тесной зависимости между концентрацией различных НОС в воде Ладожского озера и уровнем развития отдельных групп или видов водорослей. Эти зависимости были описаны высоко значимыми уравнениями множественной регрессии [Крылова, 1999]. Важным результатом работ по метабомике стало выявление пространственных и сезонных закономерностей распределения природных метаболитов и других химических соединений в воде Ладожского озера.

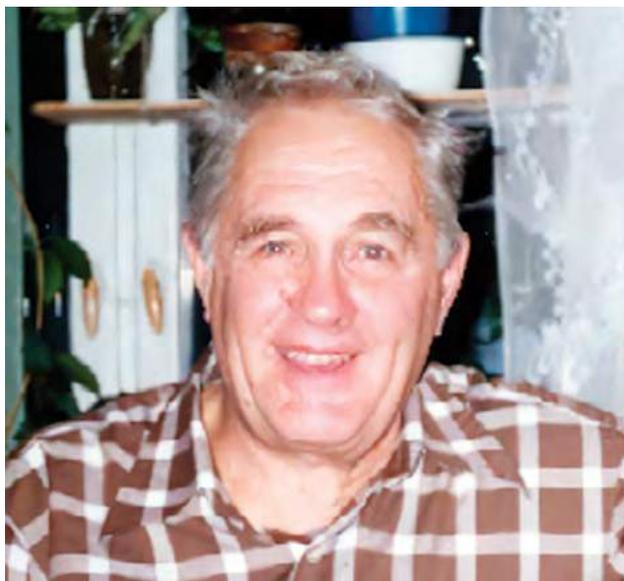


Рис. 9.1. К.х.н. Николай Никитович Коркишко – инициатор работ по метабомике фотосинтезирующих организмов в ИНОЗ РАН (1999 г.)

Дальнейшее развитие исследований по метабомике объективно должно было быть связано с включением в работы такого метода, как газовая хромато-масс-спектрометрия (ГХ/МС), поскольку только этот подход даёт возможность идентифицировать химические соединения (метаболиты организмов) до формулы. Это стало возможным благодаря совместным работам с СПбГУ с 2007 г. и использования имеющихся у них хромато-масс-спектрометрических комплексов. С этого времени основной упор в исследованиях был сделан на изучение метабомики водных макрофитов и такого явления, как аллелопатия. Период тесного сотрудничества с СПбГУ может быть определен как второй этап в развитии метабомики фотосинтезирующих организмов в ИНОЗ РАН.

Высокое геномное разнообразие высших водных растений обеспечивает огромный потенциал малых молекул (менее 900 а.е.м.), составляющих низкомолекулярные метаболические профили (НМП) конкретных видов в определенных условиях. Эти эндогенные и экзогенные молекулы могут играть важную роль во многих биологических процессах, таких как метаболизм, размножение, развитие, и реакция на изменения окружающей среды (абиотические или биотические факторы), на уровне организмов и/или популяций. Полный набор этих малых молекул, называемый метаболомом, может изменяться путем изменения в экспрессии генов и регуляции функций белков, под влиянием мутаций и воздействий различной природы эндогенного или экзогенного происхождения. Вместе с тем, некоторые метаболиты, в свою очередь, могут вызывать возмущения на транскрипционном уровне и изменять активность белков. Таким образом, метаболом водного растения можно рассматривать и как моментальный снимок организма в определенный момент времени, и как результат его развития к данной фазе в конкретных условиях среды. Метаболические профили могут быть использованы для получения информации об изменениях метаболизма, связанных с внешними факторами окружающей среды, в том числе такими, которые вызывают нарушения в нормальном функционировании систем организма, то есть являются причинами патологических процессов. Это означает, что по состоянию НМП высших водных растений и комплексам отдельных индикаторных молекул можно получить интегральную информацию о состоянии окружающей среды, в том числе о влиянии нарушающих антропогенных факторов (прежде всего, загрязнения и эвтрофирования). Конкретные взаимодействия водных макрофитов с гидробиологическим окружением будут также отражаться на составе НМП. При этом, растения формируют НМП и для влияния на других гидробионтов, поскольку химические взаимодействия – это единственно возможная для них реакция воздействия.

Исследования НМП с использованием современных аналитических процедур (в том числе ГХ/МС) могут быть мощным инструментом для выявления фенотипических реакций одного генотипа в ответ на экологические сдвиги [Ecometabolomics: Optimized NMR-based..., 2013]. В отношении морских экосистем проблематика метаболомики водных организмов была рассмотрена, например, в обзоре [Goullitquer, Potin, Tonon, 2012]. В отношении пресноводных высших водных растений данная область продолжала оставаться очень слабо изученной.

Как упомянуто выше, внимание специалистов ИНОЗ РАН обращено на такое явление, как аллелопатия. Интенсивное развитие макрофитов может существенно ограничивать вегетацию планктонных водорослей и, что особенно важно, снижать интенсивность «цветения» воды [Gross, Hilt, Lombardo, Mulderij, 2007]. Известно, например, что сине-зеленые водоросли (цианобактерии) первыми заселяют искусственные водоемы, но в дальнейшем первенство переходит к полупогруженным растениям, тогда как развитие низшего автотрофного звена ослабевает [Weisner, Thiery, 2010]. Влияние высших водных растений на фитопланктон обусловлено комплексом метаболитов макрофитов. Аллелопатическое взаимодействие этих представителей автотрофного звена давно привлекало внимание ученых в связи с тем, что установление его механизмов и действующих веществ может способствовать разработке эффективных и экологически безвредных способов управления гидробиоценозами.

Выявлено, что НОС участвуют в регуляции различных процессов взаимоотношений между водными фотосинтезирующими организмами и другими гидробионтами, в том числе макрофитов с фитопланктоном, среди которых одними из важнейших являются аллелопатические [Гуревич, 1973; Сакевич 1985; Fink, 2007; Allelopathic effects of the aquatic..., 2019; Potential Use of Aquatic..., 2022]. Подобные исследования перспективны не только для гидроэкологии, но и для других отраслей, например, сельского хозяйства, для создания эффективных экологически чистых гербицидов [Gross, Hilt, Lombardo, Mulderij, 2007; Macías, Galindo, García-Díaz, Galindo, 2008]. С этой целью в разных странах проводится всестороннее изучение биологической активности различных метаболитов макрофитов, но механизм их действия, как и компонентный состав, изучены пока недостаточно [Potential Use of Aquatic..., 2022]. Расшифровка механизмов образования метаболитов растений, установление их химической природы и трансформации в водной среде важны не только для познания процессов самоочищения водоемов от патогенной микро- и микрофлоры, но и для получения природных антимикробных, фунгицидных и альгицидных препаратов путем управляемого биосинтеза с использованием водных макрофитов [Dembitsky, 2006; Chai, Ooh, Quah, Ch, 2015; Dembitsky, 2022a, 2022b].

В связи с явлением аллелопатии в гидроэкосистемах, исследуется возможность метаболитного контроля «цветения» воды с помощью аллелопатически активных метаболитов высших водных растений или микроводорослей (или их синтезированных аналогов). По принципу аллелопатического воздействия можно предупредить или ограничить массовое развитие цианобактерий (сине-зеленых водорослей), которое приводит к «цветению» водоемов. Реализация этого исследовательского проекта позволит решить проблему «цветения» водоемов без негативных последствий для других компонентов экосистемы [Hu, Hong, 2008; Mohamed, 2017; Kurashov, Krylova, Protopopova, 2021].

Важность аллелопатии, как мощного регулирующего механизма, инициирует достаточно много исследований, посвященных изучению ингибирующего (иногда и стимулирующего) аллелопатического воздействия макрофитов на цианобактерии и водоросли в водных экосистемах [Mulderij, Mau, Van Donk, Gross, 2007; Allelopathic mechanism of pyrogallol..., 2009; Rojo, Segura, Rodrigo, 2013; Potential Use of Aquatic..., 2022.]. Известно, по крайней мере, о нескольких десятках видов макрофитов, проявляющих аллелопатическую активность в отношении цианобактерий и водорослей [Hu, Hong, 2008, Mohamed, 2017; Kurashov, Krylova, Protopopova, 2021; Potential Use of Aquatic..., 2022].

Исходя из этого, в содружестве с коллегами из СПбГУ (И.В. Штангеева, М.Г. Опекунова), Астраханского ГУ (Ю.В. Батаева, Л.Т. Сухенко), ИБВВ РАН (А.М. Чернова, Д.А. Филиппов), Институт гидробиологии НАНУ (Н.И. Кирпенко) были проведены крайне актуальные работы по обнаружению, идентификации и анализу НОС-метаболитов (включая аллелохемики) с упором на их функциональную активность некоторых наземных макрофитов. Также в работах исследовались, в основном, различные водные макрофиты и водоросли, которые могут быть использованы для управления развитием первичного автотрофного звена в водных экосистемах, выявления механизмов функционирования гидробиоценозов и оценки экологического состояния водных экосистем. Определенным успехом можно считать вышедшую в это время монографию Н.И. Кирпенко «Аллелопатическое взаимовлияние пресноводных водорослей» [Кирпенко, 2013], в которой приводятся результаты хромато-масс-спектрометрических исследований, полученных Е.А. Курашовым и Ю.В. Крыловой [Kirpenko, Kurashov, Krylova, 2012].

Одним из значимых достижений в данном направлении, полученным в Институте озероведения, было исследование компонентного состава летучих низкомолекулярных органических соединений и антибактериальная активность эфирных масел рдеста туполистного (*Potamogeton obtusifolius* Mert. et Koch) и роголистника темно-зеленого (*Ceratophyllum demersum* L.) в разные периоды вегетации растений [Митрукова, 2015]. В этой работе впервые в мире исследован компонентный состав и сезонные изменения состава НОС эфирных масел побегов рдеста туполистного (*P. obtusifolius*) и изучен компонентный состав НОС роголистника темно-зеленого (*C. demersum*) российских популяций. Также для высших водных растений указано присутствие в них важных для различных сфер человеческой деятельности соединений, в том числе маноола и биформена. На примере изученных видов показано, что качественный состав и количественное содержание метаболитов продуцируемых водными макрофитами, изменяется в их онтогенезе и находится в зависимости от условий среды обитания. Впервые определена антибактериальная активность НОС рдеста туполистного и роголистника темно-зеленого. Показано, что водные макрофиты, как возобновляемые биоресурсы, могут выступать в качестве источников ценных в практическом отношении НОС.

Следует отметить, что в результате проводимых группой Е.А. Курашова исследований были получены детальные хромато-масс-спектрометрические результаты, позволяющие раскрыть состав низкомолекулярного метаболома (НМ) большого ряда водных макрофитов из разнотипных водоемов различных географических зон от Белого до Черного и Каспийского морей: *Potamogeton natans* L., *P. perfoliatus* L., *P. lucens* L., *P. pectinatus* L., *P. obtusifolius* Mert. et Koch, *P. gramineus* L., *P. alpinus* Balb., *P. crispus* L., *Nitella syncarpa* (Thuill), *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid., *Nuphar lutea* (L.) Smith., *Ceratophyllum demersum* L., *Nymphaea alba* L., *Nitella syncarpa* (J.L.Thuillier) Kützing, *Myriophyllum spicatum* L., *M. alterniflorum* DC., *M. verticillatum* L., *Sagittaria sagittifolia* L., *Marsilea quadrifolia* L., *Ranunculus circinatus* Sibth., *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult., *Equisetum fluviatile* L., *Chara aculeolata* Kütz. in Rchb., *Persicaria amphibia* (L.) Gray, *Elodea nuttallii* (Planch.) H.St.John, *E. canadensis* Michx., *Nelumbo nucifera* Gaertn., *Sparganium emersum* Rehmman, *Trapa natans* L., *Equisetum fluviatile* L., *Nymphoides peltata* (S.G.Gmel.) Kuntze, *Ruppia maritima* L., *Zostera marina* L., *Fucus vesiculosus* L., *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis. Данные по НМ некоторых из приведенных видов получены впервые в мире, для отдельных видов – впервые в РФ.

Хронологически третий этап работы в области метаболомики водных организмов, проводимых в ИНОЗ РАН, начался в 2021 г., когда в исследованиях стал также использоваться хромато-масс-спектрометрический комплекс SHIMADZU GCMS-QP2010 Ultra, имеющийся в ИНОЗ РАН, что позволило более оперативно получать результаты.

Проведенные работы в области метаболомики водных организмов можно разделить на фундаментальные, призванные выявить определенные закономерности, связанные с синтезом макрофитов НОС в разных условиях, их составом и изменением под влиянием различных факторов, и работы, ориентированные на практическое применение полученных результатов. Ниже кратко изложены основные фундаментальные и практические результаты, полученные в рамках работ по водной метаболомике в ИНОЗ РАН в последние годы в сотрудничестве с другими организациями (СПбГУ, ГосНИОРХ им. Л.С.Берга, Астраханский ГУ, ООО «Мета-Аква»).

Фундаментальные результаты

1) Впервые проведён хромато-масс-спектрометрический анализ компонентного состава низкомолекулярных органических соединений (НОС) *Spirodela polyrhiza* (L.) Scheiden, произрастающей на Северо-Западе России. Выявлено 89 соединений, из которых идентифицировано 83. Показано, что производство ценных НОС из *S. polyrhiza* может сочетаться с другими видами использования этого растения, например, с производством биомассы, очисткой сточных вод с высокими концентрациями питательных веществ (коммунальные, промышленные и бытовые сточные воды). Особое внимание уделено обсуждению НОС с выраженной биологической и экологической функцией. Выявлены некоторые виды водных макрофитов, в которых содержание ценных в практическом отношении НОС достигает значительных величин, что делает эти виды важными с точки зрения использования их как возобновляемого растительного ресурса. Проведен теоретический анализ идентифицированных НОС в плане их биологических и экологических функций. Особое внимание было уделено оценке их потенциальной аллелопатической активности [Low-molecular weight metabolites..., 2016].

2) Впервые проведён хромато-масс-спектрометрический анализ компонентного состава НОС *Achillea micrantha*, произрастающей на юге России (Астраханская обл.). Выявлено 71 соединение, из которых идентифицировано 69. Показано, что экстракт растения обладает выраженной антибактериальной активностью [Chemical composition and antibacterial..., 2018].

3) Проведено сравнительное межгодовое исследование компонентного состава НОС роголистника тёмно-зелёного (*Ceratophyllum demersum* L.), произрастающего в пойменном озере с изменяющимся трофическим состоянием (Волго-Ахтубинская пойма). Показано, что при «макрофитном» мезотрофном состоянии озера среди НОС преобладали активные аллелохимики, из которых наиболее важны, по-видимому, жирные кислоты (фракция свободных жирных кислот). При «цианобактериальном» эвтрофном типе развития озера состав НОС роголистника характеризовался превалированием соединений, обеспечивающих повышенную защитную реакцию растения (наиболее важен маннол), в условиях угнетающего воздействия со стороны цианобактерий, что выразилось также в снижении общего уровня синтеза соединений (почти в 2 раза) [Kurashov, Mitrukova, Krylova, 2018].

4) Показано, что растения могут активно влиять на содержание НОС в грунте и активно очищать его от полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и соединений брома. При этом способность к ремедиации грунта, загрязненного ПАУ, зависит от дополнительного его загрязнения некоторыми неорганическими соединениями, в частности, бромом. Также показано, что загрязнение тяжелыми металлами и интенсивность техногенной нагрузки влияет на общее содержание эфирных масел растений, их органолептических характеристик и компонентного состава НОС [Potential of wheat (*Triticum*..., 2018; Effects of Potassium and..., 2022].

5) Впервые проведена оценка 4 видов биологических активностей (противоопухоловой, противовоспалительной, противогрибковой, антибактериальной) с помощью PASS (прогноз спектров активности веществ) с использованием методологии QSAR для основных компонентов трех широко распространенных пресноводных макрофитов (*N. lutea*, *C. demersum* и *P. obtusifolius*). Показано, что идентифицированные мажорные метаболиты данных видов выступают не только как ключевые компоненты в регуляции биохимических и метаболических путей и процессов в водных экосистемах, но и имеют важное потенциальное значение как фармакологические агенты в борьбе с различными заболеваниями. Выявлены наиболее перспективные аллелохимики, способные индуцировать подавление

ние роста цианобактерий. Показана необходимость и перспективность разработки конвергентной технологии ограничения развития цианобактерий в водных экосистемах на основе природного механизма аллелопатии [Kurashov, Fedorova, Krylova, Mitrukova, 2016; Курашов, Федорова, Крылова, 2018].

6) Впервые проведено хромато-масс-спектрометрическое исследование эфирного масла рдеста пронзённолистного (*P. perfoliatus*, семейство Potamogetonaceae) в начале фазы плодоношения, произрастающего в Свирской губе Ладожского озера, с целью выявления его качественного и количественного состава. Всего обнаружено 134 НОС, из которых идентифицировано 124. Показано, что в компонентный состав НОС рдеста пронзённолистного входит большое количество соединений с разнотипной биологической активностью, которые, возможно, играют определенную роль в биотических взаимодействиях *P. perfoliatus* с другими гидробионтами в озерной экосистеме [Крылова, Курашов, Митрукова, 2016].

7) Проведена оценка возможности использования низкомолекулярного метаболома (НМ) водных макрофитов для индикации экологического состояния водных экосистем. Показано, что формирование НМ 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. Выделены индикационные признаки НМ у ряда видов пресноводных макрофитов, позволяющие детектировать антропогенную нарушенность биотопа. Предложен новый интегральный метод оценки стабильности состояния водных экосистем на основе анализа НМ, произрастающих в них макрофитов [Перспективы использования низкомолекулярного..., 2018].

8) Впервые в мире проведено хромато-масс-спектрометрическое исследование НМ горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, семейство Polygonaceae Juss.) в фазе цветения, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского озера, с целью выявления его качественного и количественного состава. Всего обнаружено 124 НОС, из которых идентифицировано 110. Среди НОС горца земноводного преобладали карбоновые кислоты (50–60 % по содержанию), альдегиды (9–14 %) и углеводороды (6–9 %). НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прошлом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107 и 114) и их общим содержанием в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях. Наличие целого ряда биологически активных метаболитов в составе НМ *P. amphibia* свидетельствует о выраженном влиянии данного растения на гидробиоценозы литорали Ладоги [Крылова, Курашов, Русанов, 2020].

9) Исследован метаболитный состав биомассы и культуральной среды у нового устойчивого к алкилфенолам (АР) гриба, обозначенного F6, выделенного из донных отложений прибрежной части Восточного Финского залива (Невская губа) и идентифицированного как *Aspergillus tubingensis* F6. Выявлены адаптивные защитные ответы, используемый *A. tubingensis* F6 против tNP- и 4-трет-октилфенол-индуцированного стресса, основанные на способности штамма эффективно использовать ксенобиотики. Показано, что деградация АР под действием *A. tubingensis* F6 приводила к образованию нетоксичных продуктов. Эти данные указывают на потенциальную роль *A. tubingensis* F6 в деградации АР в естественной среде, а также на его возможное биотехнологическое применение при очистке сточных вод для удаления ксенобиотиков с эндокринной активностью [Defense Responses of the..., 2020].

10) Получены данные по формированию компонентного состава низкомолекулярных органических соединений у водных макрофитов, составляющих их низкомолекулярный метаболом, при вселении в новые места. Показано, что при вселении *Potamogeton pectinatus* L. в Ладожское озеро произошло изменение содержания в эфирном масле различных групп НОС и смена комплекса мажорных компонентов по сравнению с озерами нативного ареала. Примерно треть соединений в составе НМ были специфичны как у инвазионной популяции рдеста гребенчатого в Ладожском озере, так и у популяций рдеста из водоёмов нативного ареала. Пластичность метаболизма *P. pectinatus* позволяет ему адаптироваться к существованию в широком диапазоне абиотических условий и различного биологического окружения и вселяться в новые местообитания, прежде всего, в находящиеся под антропогенным воздействием [Kurashov, Krylova, Rusanov..., 2020].

11) Люминесцентная микроскопия (ЛМ) была использована для оценки воздействия аллелохемиков водных макрофитов на цианобактерии. Были изучены изменения физиологического состояния культур цианобактерий *Synechocystis aquatilis* и *Aphanizomenon flos-aquae* под влиянием аллелохе-

миков водных макрофитов в лабораторных экспериментах. Показано (в том числе с использованием ЛМ), что выбранные аллелохемики (линолевая, гептановая, октановая, тетрадекановая, гексадекановая и галловая кислоты) обладают ингибирующей аллелопатической активностью в отношении цианобактерий. Самые высокие значения индекса подавления ($SI > 10$) были зарегистрированы (в порядке возрастания) для гексадекановой, линолевой, тетрадекановой, галловой кислот и смеси четырех аллелохимических веществ (гептановая, октановая, тетрадекановая и галловая кислоты). Доказано, что создание нового поколения альгицидов / цианоцидов на основе аллелохемиков водных растений является очень многообещающей стратегией борьбы с «цветением водорослей» [Kurashov, Kapustina, Krylova, Mitrukova, 2020].

12) Обнаружено, что на основе аллелопатии – естественного явления как стимулирующего, так и подавляющего воздействия одного растения на другое, включая микроорганизмы, возможно решить проблему вредного «цветения» водорослей (ВЦВ), опасного природного явления, которое часто возникает под воздействием антропогенных факторов, например, при антропогенном эвтрофировании водоемов. Показано, что аллелохимические вещества макрофитов можно рассматривать как природные альгициды, которые могут стать основой природоподобной конвергентной технологии для подавления развития планктонных цианобактерий и предотвращения ВЦВ в водоемах. Проведено обобщение мировой литературы по подавлению макрофитами цианобактерий. Эффективность подавления «цветения» цианобактерий продемонстрирована на примере полевых экспериментов с мезокосмами и природным фитопланктоном [Kurashov, Krylova, Protoporova, 2021].

13) Выявлено, что в Астраханском регионе в условиях аридного экстремального климата с полупустынным ландшафтом формируются сообщества почвенных актиномицетов со специфическими свойствами. Штамм *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) выделен из засоленных почв аридной зоны. В работе изучен компонентный состав суспензии и экстрактов (водно-спиртового, метанольного и гексанового) штамма *S. carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), обладающего противовирусными, инсектоакарицидными, фунгицидными и фитостимулирующими свойствами, методом ГХ/МС. Определение метаболитов штамма показало, что выявленные НОС обладают ценными с сельскохозяйственной точки зрения свойствами: бактерицидными, фунгицидными, инсектоакарицидными. Исследуемый штамм может быть использован в качестве основы для создания экологически безопасных биологических средств защиты растений, обладающих высокой биологической эффективностью в качестве инсектицидов, акарицидов, фунгицидов, бактерицидов и фитостимуляторов [Изучение метаболитов *Streptomyces*..., 2021; Биологическая активность и состав..., 2023].

14) Методом ГХ/МС изучен качественный и количественный состав НМ цианобактерии *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, 1892 (Cyanophyceae: Merismopediaceae). Этот вид хорошо культивируется и может быть объектом лабораторного и промышленного культивирования для дальнейшего многогранного использования его метаболитов. В результате исследования в метаболоме этой цианобактерии идентифицировано множество биологически активных соединений. Результаты дают базовую информацию для выбора *S. aquatilis* для различных практических применений, а также предоставляют знания для будущего использования *S. aquatilis* для новых штаммов *Synechocystis* в производстве специфических метаболитов с высокими концентрациями. Использование изучаемого штамма *S. aquatilis* (а также других штаммов этого рода) для производства «натуральных» соединений представляется перспективным и выгодным в связи с повышенным потребительским спросом на продукцию с пометкой «натуральный» [Krylova, Kurashov, 2022].

15) Впервые исследован компонентный состав НМ рдеста пронзённолистного (*P. perfoliatus*), произрастающего в Астраханской области (култучная зона р. Волги). В составе НМ *P. perfoliatus* выявлено 164 компонента, из которых было идентифицировано 151 соединение. Мажорными НОС были карбоновые кислоты, а также фитол и фитон, характеризующиеся разноплановой биологической активностью. Показано, что экстракт *P. perfoliatus* обладает более выраженными антиоксидантными свойствами, чем протестированные лекарственные препараты (аскорбиновая кислота и эмоксипин). *P. perfoliatus* из култушной зоны р. Волги и может рассматриваться как природный возобновляемый ресурс для получения сырья при создании эффективных композитов альгицидов нового поколения для борьбы с цианобактериальным «цветением», а также для получения ценных природных форм НОС растительного происхождения для различных типов применения в фармакологии, медицине, косметологии, пищевой промышленности и других отраслях [Крылова, Новиченко, Курашов, 2022].

Практические результаты

Одним из наиболее актуальных направлений практического применения полученных результатов является использование метаболитов-аллелохимиков для ослабления и подавления развития опасных цианобактериальных «цветений» (ОЦЦ) в водоемах. Как определенный успех в данной области, достигнутый в нашей стране, следует упомянуть первый разработанный коллективом авторов из вышеупомянутых организаций под руководством Е.А. Курашова альгицид нового поколения на основе метаболитов – аллелохимиков водных растений для подавления избыточного развития цианобактерий и зеленых водорослей [Патент № 2709308, 2019]. Эффективность созданного альгицида нового поколения в подавлении развития цианобактериальных популяций на первом этапе была продемонстрирована в лабораторных экспериментах [Kurashov, Kapustina, Krylova, Mitrukova, 2020; Kurashov, Krylova, Protopopova, 2021]. Следующим этапом стали эксперименты в полевых условиях с мезокосмами.

Как итог проведенных экспериментов по влиянию альгицида из четырех аллелохимических компонентов (гептановой, октановой, тетрадекановой и галловой кислот) на фитопланктон природных водоемов с преобладанием цианобактерий в условиях мезокосмов стали результаты, свидетельствующие о том, что аллелохимические вещества водных макрофитов способны: 1) эффективно снижать развитие фитопланктона и подавлять даже интенсивные ОЦЦ; 2) привести к замещению опасных цианобактерий в фитопланктоне безопасными водорослями (в частности, криптофитовыми), продукция которых может быть использована в пищевых цепях гидробионтов [Kurashov, Krylova, Protopopova, 2021].

Следующим шагом в проверке действия альгицида на цианобактерии природных водоемов стали эксперименты с целыми экосистемами. Было проведено два таких эксперимента по экологической реабилитации прудовых водных экосистем. В первом эксперименте обработке подвергся небольшой пруд в Ленинградской обл., где наряду с цианобактериями интенсивно развивались нитчатые водоросли, формирующие скопления метафитона (рис. 9.2), зоопланктон был крайне деградирован (биомасса менее 50 мг/м³). После обработки пруда альгицидом до конечной концентрации его в воде около 1 мг/л качество воды значительно улучшилось и сохранялось таковым через 45 дней после начала эксперимента (рис. 9.2), цианобактерии были полностью подавлены, исчезли скопления метафитона, зоопланктон стал разнообразней, а его биомасса возросла более, чем в 9 раз (до 450 мг/м³).

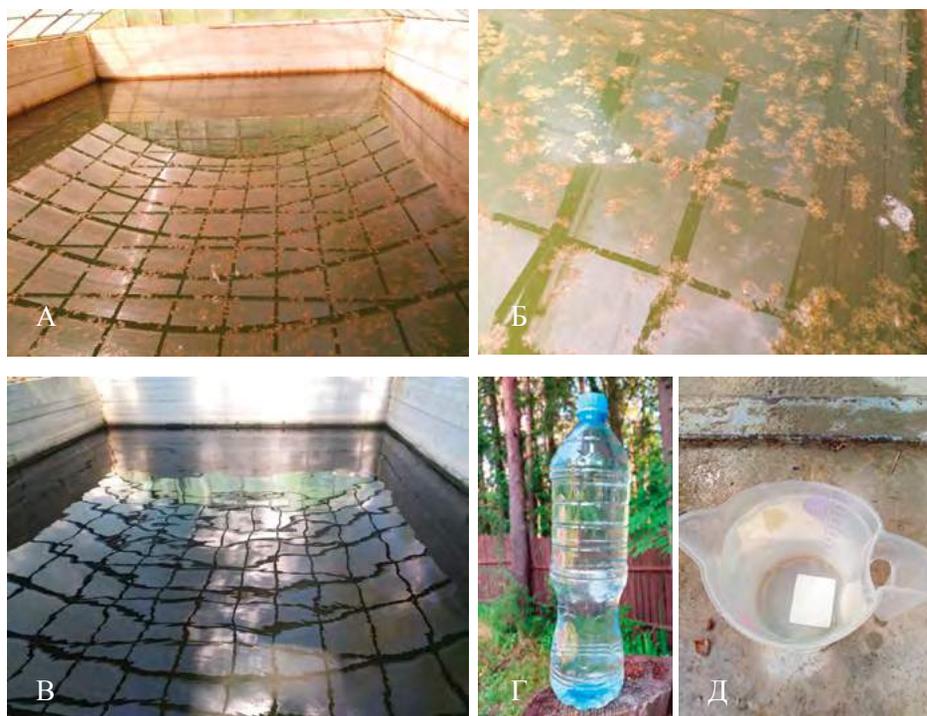


Рис. 9.2. А – общий вид пруда до обработки альгицидом (6 июля); Б – детальный вид состояния водной поверхности до обработки; В – общий вид пруда через 45 дней после обработки альгицидом; Г, Д – визуальное качество воды через 45 дней после обработки альгицидом

Второй эксперимент был проведен в гиперэвтрофном Воскресенском канале у Инженерного замка. Пруд был перегорожен пополам, одна изолированная часть обрабатывалась альгицидом, другая служила контролем. Ситуация осложнялась тем, что данный пруд постоянно находился под воздействием птерозвтрофирования, в него поступали ливневые стоки с крыши, где обитает большое количество голубей. При этом, обработанная часть подвергалась более интенсивному эвтрофированию (сток из 3-х ливневых труб), чем необработанная часть (сток из 2-х труб), что подтвердилось данными по общему фосфору и аммонии (табл. 9.1). Несмотря на это, в ходе эксперимента удалось добиться заметного снижения развития цианобактерий в обработанной части пруда (рис. 9.3). Фиксируемые показатели состояния водной экосистемы и продуктивности фитопланктона также показали эффективность действия препарата (табл. 9.1). В работах по оценке воздействия на прудовые экосистемы кроме авторов данного материала принимали участие сотрудники Лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН: к.б.н. Л.Л. Капустина, к.б.н. Г.Г. Митрукова, Е.В. Протопопова, А.Д. Старухина.

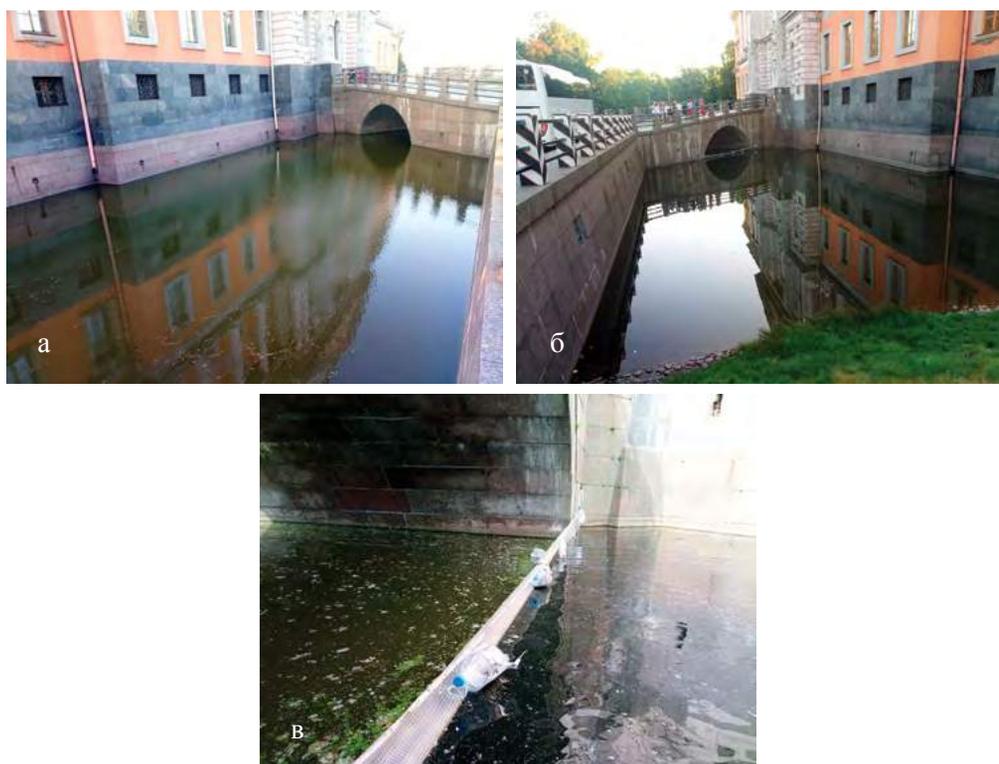


Рис. 9.3. Характер водной поверхности (внешний вид) в необработанной (а) и обработанной (б) частях Воскресенского канала 7 июля через 16 дней после обработки альгицидом; в) характер водной поверхности в необработанной и обработанной частях 3 июля через 12 дней после обработки альгицидом

Табл. 9.1. Средние значения оцененных показателей за время эксперимента по воздействию альгицида на фитопланктон Воскресенского канала

Показатели	Обработанная часть	Необработанная часть
BGA-PC (фикоцианин), мкг/л	19,8	29,7
Chl-a (хлорофилл-а), мкг/л	51,7	61,5
O ₂ , мг/д	9,9	11,4
pH	9,2	9,4
Доля мертвых клеток цианобактерий, %	28,58	18,22
Фосфор общ., мг/л	0,141	0,111
Аммоний, мг/л	0,160	0,124

Развитие водной метабомики в ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН продолжалось, в том числе, и в рамках выполнения гранта РФ № 22-24-00658 «Разработка конвергентной природоподобной технологии предотвращения цианобактериальных «цветений» внутренних водоемов в целях осуществления рационального природопользования водными ресурсами Российской Федерации и создание базы знаний по низкомолекулярному метаболиту пресноводных макрофитов» (2022–2023). В данном проекте рассмотрена проблема контроля ОЦЦ в русле внедрения в практику хозяйствования в РФ природоподобной конвергентной технологии, имитирующей природное явление аллелопатии макрофитов, то есть применение альгицидов нового поколения на основе веществ-аллелохемиков водных растений.

Глава 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТОКСИЧНОГО «ЦВЕТЕНИЯ» ВОДЫ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ БОРЬБЫ С НИМ

К числу острейших глобальных экологических проблем современности относится «цветение» цианобактерий (сине-зеленых водорослей) в водоемах, являющееся следствием процесса антропогенного эвтрофирования водных объектов. Его вызывает бесконтрольное поступление в водоемы сточных вод промышленных, сельскохозяйственных, коммунально-бытовых и иных предприятий. Избыточное количество биогенных элементов, прежде всего фосфора и азота, приводит к резкому увеличению продуцирования водными экосистемами органического вещества и массовому «цветению» водных объектов, в котором доминирующую роль играют развивающиеся в геометрической прогрессии цианобактерии. Попадание последних в места водозаборов, их налипание на стенках и решетках приводит к забиванию входных устройств и вынужденной остановке сооружений водоподготовки муниципальных образований, тепловых и атомных электростанций, гидротехнических и промышленных предприятий и т.д. Отмирающие цианобактерии в огромных объемах оседают на дно водных объектов, что приводит в периоды их разложения к образованию заморных зон и массовой гибели рыб. Еще большее беспокойство и негативные социальные последствия вызывает характерное для многих представителей цианобактерий продуцирование в процессе жизнедеятельности токсинов и выделение их в водную среду. Известны такие опасные токсины цианобактерий, как микроцистин, нодуларин, анатоксин и другие, которые по механизму воздействия на человека Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) делятся на три группы: блокираторы фосфаты, нейротоксины и цитотоксины [World Health Organization, 2003]. Такие вещества вызывают негативные последствия употребления воды «цветущих» водоемов в питьевых целях, которые получили название «гаффской» и «юксовской» болезни по месту их установления с характерным для нее падежом домашнего скота и других животных, отравлением людей нередко с летальным для них исходом. Проблема «цветения» цианобактерий на водоемах и ее возможные серьезные социально-экономические последствия привлекли внимание специалистов Института озераведения РАН еще в 2011 г. [Румянцев, Крюков, Поздняков, Жуковский, 2011].

Сегодня достоверно установлено, что цианобактериальное «цветение» воды сопровождается гибелью биотического комплекса самоочищения водоемов и неминуемым крахом безопасного питьевого водоснабжения и рекреации. Диагностируются острые и хронические отравления токсинами цианобактерий, происходит распространение холерного вибриона, вирусов полиомиелита и эпидемических гастроэнтеритов [Калинникова, Гайнутдинов, Шагидуллин, 2017; Cytotoxicity evaluation of large..., 2016]. Очень популярное среди российских туристов озеро Котокель – спутник Байкала, в 2008 г. было закрыто для посещения Роспотребнадзором по Республике Бурятия из-за обнаруженной токсичности воды. Было зафиксировано более 20 случаев отравления людей и гибель одного из них из-за употребления ими в пищу зараженной цианотоксинами рыбы. Такого рода заражение сложно уничтожить как термической обработкой, так и длительным хранением при минусовых температурах [Случай возникновения гаффской болезни..., 2009].

В развитых зарубежных странах массовое проявление цианобактериального «цветения» водоемов с выделением в воду токсичных веществ рассматривается как национальная проблема. В некоторых из них (Швеция, Англия, Финляндия, Норвегия и др.) созданы государственные службы мониторинга массового развития цианобактерий и научные центры по их изучению и методам борьбы с ними. Сегодня имеется много различных синтетических альгицидов, химическое действие которых останавливает развитие цианобактерий. Вместе с тем они представляют угрозу для других обитающих в водоеме биологических сообществ, поэтому на практике их использование очень ограничено и требует обязательного контроля со стороны природоохранных служб. Весьма интересными представляются начатые в последнее время работы по созданию биологических методов борьбы с цианобактериями. Предполагается возможность удерживания массового развития цианобактерий в водоеме путем распространения в нем эффективных видов гидробионтов-антагонистов в конкурентной борьбе за пищевые ресурсы и экологические ниши, а также специфических бактериофагов беспозвоночных животных-потребителей цианобактерий. Несмотря на большое число предложенных методов борь-

бы с цианобактериальным «цветением» воды и имеющиеся положительные результаты, ставить вопрос об универсальном методе пока преждевременно, если конечно, он вообще возможен. В обозримой перспективе, по-видимому, можно рассчитывать лишь на создание эффективного комбинированного подхода, включающего для конкретного водного объекта свой набор экологических методов различной природы: физической, химической, биологической, биохимической и т.д.

Начатые в ИНОЗ РАН под руководством академика РАН Владислава Александровича Румянцева комплексные исследования проводятся как на естественных водных объектах, так и в лабораторных условиях с учетом сложных механизмов перестройки метаболизма и физиологии цианобактерий под влиянием внешних факторов [Многопрофильные натурные и лабораторные..., 2017; Румянцев, Рыбакин, 2019; Румянцев, Рыбакин, Рудский, Коровин, 2021; Проблема регуляции токсигенного..., 2022]. Комбинированный подход к решению задачи подразумевает выполнение двух условий: минимальное воздействие на экосистему в целом и максимально допустимое при соблюдении первого условия подавление развития цианобактерий, прежде всего, токсикогенных. В качестве основополагающего метода при создании комбинированного подхода наиболее целесообразно использовать ультразвук малой интенсивности с частотой более 20 кГц, который в настоящее время является наиболее перспективным и «экологически чистым» решением проблемы цианобактериального «цветения» пресноводных объектов.

Уже более 20 лет в различных странах мира применяются ультразвуковые устройства, среди которых основными и наиболее известными являются: Aquanet (фирма Thomas-Electronics, Бельгия), MPC Buoy, XXL (фирма LG Sound, Нидерланды), серия SS (фирма Sonic Solutions, США), серия ES, PVSystem (фирма Envirosonic, Великобритания) и другие. Одновременно с разработкой новых устройств для водных объектов в лаборатории проводятся широкие исследования по выявлению механизма воздействия ультразвука различной интенсивности на клетки цианобактерий разных видов, сапрофитных микроорганизмов и колиморфных бактерий [Киселев, Румянцев, Рыбакин, 2014а; Румянцев, Крюков, Рыбакин, Киселев, 2015; Многопрофильные натурные и лабораторные..., 2017; Tekile, Kim, Lee, 2017; World Health Organization, 2003].

Сегодня принято считать, что цианобактерии, находящиеся вблизи источника ультразвукового облучения, подавляются путем разрушения клеточной мембраны (<http://www.thomas-electronics.be>), на средних расстояниях от источника разрушаются вакуоли цианобактерий, а расположенные далеко от источника погибают от вызванного им стресса. Понятие «стресс» здесь употребляется в обобщенном смысле, и под него подпадают различные механизмы, включая отделение клеточной стенки от мембраны цианобактерии, сбой в регуляции генов, нарушения в функционировании фотосинтетической системы [Многопрофильные натурные и лабораторные..., 2017].

Несмотря на достигнутые серьезные успехи в практическом использовании ультразвука в борьбе с цианобактериальным «цветением» водоемов, осталось много невыясненных моментов фундаментального характера, без понимания которых нельзя обеспечить получение стабильных результатов. Сказанное, прежде всего, относится к поведению токсигенных цианобактерий, что является вполне закономерным в силу невозможности выяснения механизмов воздействия на них ультразвука при осуществлении исследований непосредственно на водных объектах.

В ИНОЗ, кроме выполнения «традиционных» работ на водоемах, впервые были развернуты специальные исследования воздействия ультразвука на токсигенные цианобактерии в лабораторных условиях. Отправной точкой для них стали проведенные ранее натурные и лабораторные эксперименты с цианобактериями [Многопрофильные натурные и лабораторные..., 2017]. Здесь приведены результаты многолетних исследований ультразвукового воздействия на токсигенные цианобактерии одного из доминирующих на северо-западе Российской Федерации вида *Synechocystis sp.* В опытах использовали искусственно поддерживаемые в лабораторных условиях чистые культуры цианобактерий, культивируемые в 100 % среде Громова № 6. Экспериментальная культура выращивалась при однократном заселении емкостей с готовой средой инициальным количеством исходной культуры. Штамм *Synechocystis sp.* представляет собой одноклеточные бактерии, иногда агрегирующие, которые достаточно равномерно распределяются по объему экспериментального цилиндра. Это позволяло отбирать репрезентативные пробы для микроскопии, люминесцентной микроскопии и спектрофотометрии, которые применяли в экспериментах в качестве методов контроля [Сиделев, Голоколенова, Чернова, Русских, 2015].

Эксперименты осуществлялись на специально созданной программируемой установке с 10 каналами, снабженной ультразвуковыми излучателями и одного контрольного канала без излучателя. Фотография установки приведена на рис. 10.1.



Рис. 10.1. Плечо с пятью каналами с излучателями и контрольным каналом лабораторной ультразвуковой установки для моделирования

Диапазон частот f изменяли в пределах от 40 до 300 кГц, интенсивность акустического сигнала задавалась напряжением на излучателе U от 1 до 4 В. Для контрольного канала $f = 0$ и $U = 0$. Для ультразвукового облучения использовались излучатели АД-20 производства Концерна «Океанприбор», которые размещались под дном экспериментальных стеклянных цилиндров. С целью улучшения прохождения ультразвуковых колебаний в среду в месте контакта с цилиндрами на излучатели наносилась консистентная смазка. Цилиндры были зафиксированы и отделены от стола звукопоглощающим материалом, а для исключения электромагнитных наводок были закрыты фольгой. Для генерации сигнала использовались специально разработанные программируемые генераторы. Пространственное распределение и величина звукового давления, создаваемого ультразвуковыми колебаниями, оценивалась с помощью гидрофона, откалиброванного в диапазоне 20–200 кГц. В эксперименте создавали и поддерживали условия, близкие к оптимальным для их роста в природной среде: по концентрации растворённых минеральных веществ и температуре воздуха в диапазоне 22–26°C.

Оценка концентраций клеток во всех экспериментальных емкостях проводилась посредством измерения оптического поглощения суспензии цианобактерий на однолучевом сканирующем спектрофотометре Shimadzu UV-mini 1240 (спектральный диапазон прибора 190–1100 нм) по отработанной ранее методике. Было показано, что величина показателя оптического поглощения суспензии цианобактерий имеет очень высокую корреляцию с концентрацией клеток, подсчитанной с помощью микропипетирования, что было отмечено также в работах [Волошко, Пиневиц, 2014; Гладышев, Колмаков, Кравчук, 2001; Румянцев, Крюков, 2012].

Изменение показателя оптического поглощения в ходе 22-х дневного эксперимента при разных параметрах ультразвукового излучения демонстрировало резко выраженный рост числа цианобактерий в первые 12 дней. Затем концентрация клеток в экспериментальных емкостях под воздействием ультразвука, в отличие от контрольной, начинала снижаться примерно с 12–15-го дня облучения. При этом подвергаемые ультразвуковому воздействию клетки цианобактерий начинали активно оседать на дно стеклянных емкостей, покрывая его различным по высоте слоем прямо над расположенными и работающими под ними ультразвуковыми излучателями. Вполне естественным было предположить, что потеря клетками плавучести связана с ослаблением состояния культур, наличием в них истощенных, отмирающих и мертвых клеток. Чтобы убедиться в правильности этого предположения, была осуществлена люминесцентная микроскопия жизнеспособности клеток. Благодаря явлению автофлуоресценции у цианобактерий, с помощью флуоресцентного микроскопа МИКМЕД-2.16 был проведен учет количества живых и мертвых клеток цианобактерий в контрольной и экспериментальных емкостях. Полученные в результате этих экспериментов данные показали, что воздействие ультразвука на цианобактерии ускоряет естественный процесс старения и отмирания клеток.

Цианобактерии вида *Synechocystis sp.* обладают слабо развитым, но достаточно заметным слизистым чехлом, состоящим преимущественно из экзосахаридов и экзопротеинов, напрямую связанным с функциональными особенностями всех внеклеточных структур [Fisher, Allen, Luo, Curtiss, 2013]. Ранее было показано, что клеточная стенка и слизистый чехол у цианобактерий развиваются

и становятся более толстыми в случаях солевого стресса (хлорид натрия), воздействия тяжелых металлов (кобальт, кадмий) и недостатка биогенов (железо). Это свидетельствует о большом влиянии или, как отмечается в работах микробиологов, управляемости чехлом факторов внешней среды. Отсюда есть основания предполагать возможные изменения толщины чехла и под воздействием ультразвукового облучения. При положительном результате размер слизистого чехла может в дальнейшем стать удобной инструментальной характеристикой фиксации стресса цианобактерий, вызванного действием на них ультразвука малой интенсивности.

Для проверки высказанного предположения о влиянии акустического поля на рост толщины слизистого чехла, в 1-й и 22-й день эксперимента из контрольного и экспериментальных цилиндров были отобраны пробы. С помощью микроскопа МИКМЕД-2.16 с увеличением, кратным 100, после предварительного подкрашивания тушью были сделаны и откадрированы по единому протоколу фотоснимки (рис. 10.2).

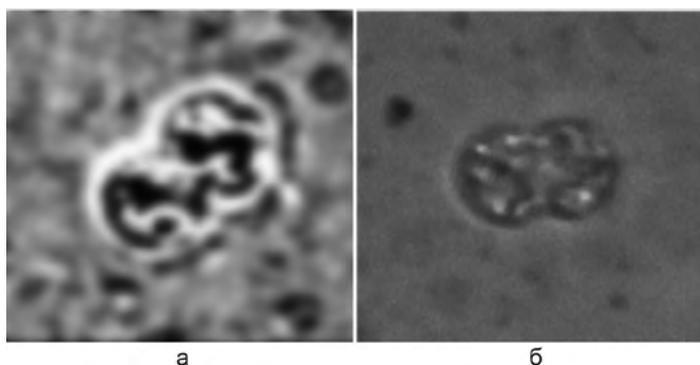


Рис. 10.2. Микрофотографии клеток цианобактерий *Synechocystis sp.* после акустического облучения: а) $f = 75$ кГц, $U = 2$ В, б) $f = 75$ кГц, $U = 4$ В

Ореол более светлого тона, по сравнению с фоном окружающей клетки, соответствует слою слизи. Измерение толщины слоя слизи проводили по фотографиям в точке фокуса границы клетки. Изменения относительной толщины слизистого чехла, покрывающего клетки цианобактерий *Synechocystis sp.*, для некоторых параметров ультразвукового облучения приведены на рис. 10.3.

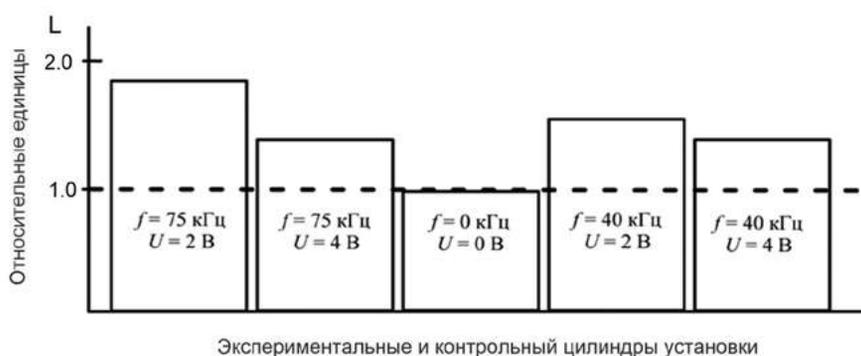


Рис. 10.3. Изменения относительной толщины слоя слизи (L) на оболочках клеток в зависимости от частоты и интенсивности ультразвукового сигнала

Можно видеть, что толщина слизистого чехла была наименьшей у цианобактерий в контрольном цилиндре при отсутствии ультразвукового облучения. Данные, полученные для экспериментальных цилиндров, подтвердили высказанное предположение. Воздействие ультразвука на клеточную стенку цианобактерий *Synechocystis sp.* приводит к дополнительной выработке слизи и увеличению толщины слизистого чехла. Выявленный эффект служит достаточно убедительным основанием признать, что воздействие ультразвука малой интенсивности на токсигенные цианобактерии

Synechocystis sp. является для них серьезным стрессом. Для повышения стрессоустойчивости в качестве ответной реакции на ультразвук цианобактерии увеличивают толщину стенок клеток и слизистого чехла, для чего осуществляют запуск механизма биосинтеза экзосахаридов и экзопротеинов.

Для токсикогенных цианобактерий одним из наиболее важных моментов жизнедеятельности является биосинтез токсинов. Из результатов предыдущего эксперимента предварительно формируется представление о том, что отмеченный рост толщины стенок клеток и слизистого чехла затрудняет обмен веществ в системе клетка-среда и, следовательно, препятствует клеткам расти и развиваться так, как это имеет место в нормальных условиях. По крайней мере, можно было ожидать, что рост толщины должен негативно сказаться на биосинтезе клетками токсинов и их выведении в водную среду. В то же время известны работы по микробиологии, не относящиеся к ультразвуковому облучению, в которых отмечено повышение корреляции токсичности клеток токсикогенных цианобактерий с утолщением слизистого чехла [Allen, Rittmann, Curtiss, 2019; Kehr, Dittmann, 2015]. Чтобы опровергнуть или подтвердить высказанное предположение, был проведен эксперимент с определением токсичности воды в цилиндрах при воздействии на цианобактерии *Synechocystis sp.* ультразвукового облучения. Так как в данном случае интерес представлял, прежде всего, сам факт наличия или отсутствия биосинтеза токсинов, а не их виды, то для констатации токсичности воды использовали широко применяемый в водной токсикологии метод биоиндикации с использованием дафний *Daphnia magna* [Загребин, Румянцев, Тонкопий, 2014]. В нём уровень токсичности определяется относительным количеством погибших организмов.

В результате получены данные, которые позволяют отметить несколько важных моментов, проявляющихся у цианобактерий под воздействием ультразвукового стресса. Высокий процент гибели дафний на первом этапе эксперимента свидетельствует о том, что токсигенные цианобактерии для защиты от ультразвукового облучения, одновременно с ростом толщины слизистого чехла, запускают второй механизм – биосинтез токсинов и их выделение в водную среду. Этот механизм наиболее отчетливо проявляется в течение примерно двух недель, а затем процент гибели дафний падает. Это свидетельствует о снижении и полном прекращении биосинтеза токсинов, несмотря на продолжающееся ультразвуковое облучение. Объяснение этому факту с нашей точки зрения состоит в следующем. Возникшее под воздействием ультразвука стрессовое состояние цианобактерий приводит к резкой активизации механизмов метаболизма. Причиной служит необходимость дополнительного синтеза экзополисахаридов и экзопротеинов для роста слизистого чехла, а также и белков с целью обновления внеклеточных белковых структур, разрушаемых акустической вибрацией. Для цианобактерий это связано с большими энергетическими затратами. К серьезным энергетическим потерям приводит и биосинтез клетками токсинов, которые токсигенные цианобактерии используют при жизни в наиболее опасные для их существования моменты. Энергозатратность цианобактерий на одновременный запуск и поддержание двух механизмов повышения стрессоустойчивости является для них непомерно высокой платой и негативно сказывается на продуктивности клеток и их жизнеспособности. Через некоторое время накопленный и невозполнимый в условиях стресса энергетический запас у токсигенных цианобактерий истощается и наступает фаза отмирания и гибели клеток.

Лабораторные эксперименты были проведены для одного вида токсигенных цианобактерий, являющиеся одним из доминирующих на водоемах Северо-Запада РФ. Опираясь на микробиологические работы общего характера, есть основания полагать, что при рассмотрении других видов содержание выводов останется прежним, а соотношения параметров ультразвука и скорой реакции цианобактерий могут измениться. Для понимания возможностей практического применения ультразвука, как средства регуляции «цветения» на водоемах, полученные в лабораторных условиях данные были дополнены материалами экспериментальных работ, выполненных с нетоксигенными цианобактериями непосредственно на водных объектах.

В работе отмечено, что продолжительность времени от начала воздействия ультразвукового облучения до появления заметного улучшения экологического состояния в каждом конкретном водоеме зависит от его индивидуальных морфометрических, физико-химических и экологических параметров. К ним относятся размер, глубина водоема, температура и освещенность поверхности воды, мутность и время водообмена, содержание биогенных веществ, особенно фосфатов и нитратов, присутствующие в водоеме типы водорослей, характер донных отложений и т.д. Например, для ультраз-

вуковых устройств фирмы Sonic Solutions, в зависимости от названных условий, первые позитивные изменения в экологическом состоянии водоема могут быть замечены в течение двух недель после установки ультразвукового устройства. В период от 6 до 12 недель устройство будет подавлять развитие цианобактерий, прорастающих из спор. После 12 недель работы ультразвуковое воздействие на водоем позволит и дальше поддерживать его в состоянии, очищенном от цианобактерий.

В отношении устройств фирмы Sonic Solutions установлено, что, по мере удаления от объектов воздействия, эффективность подавления различных типов водорослей и биопленок неодинакова. Так, например, оценка максимальной дальности подавления биопленок устройством SS400 составляет 62 м, зеленых водорослей – 155 м, цианобактерий – 412 м. Опираясь на эти данные, можно поверить как в различие механизмов воздействия ультразвука на указанные организмы, так и о едином механизме воздействия, но разной устойчивости организмов к ультразвуку.

Первые испытания ультразвукового устройства были проведены специалистами ИНОЗ РАН в период вегетации цианобактерий в 2014 г. на пруду Михайловского сада с применением американской ультразвуковой установки SS-400 (рис. 10.4).



Рис. 10.4. Ультразвуковая установка SS-400, поставленная у берега с помощью плотика в контрольной части пруда Михайловского сада

Согласно заявленным техническим характеристикам, данное ультразвуковое устройство SS-400, выпускаемое американской фирмой Sonic Solutions и обладающее направленной диаграммой направленности, должно было воздействовать на все виды цианобактерий на расстоянии до 411 м. В период с 15 мая по 18 сентября на контрольном и экспериментальном участках пруда проводился еженедельный отбор проб: фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, микопланктона, а также определяли общее микробное число и численность лактозоположительных кишечных палочек. Кроме того, в ходе исследований в пробах определялись гидрохимические характеристики воды: температура, удельная электропроводность, водородный показатель, содержание растворенного кислорода (абсолютное и относительное), взвешенные вещества, неорганический и общий фосфор, азот аммония, нитриты, нитраты, общий азот, величина химического потребления кислорода и биохимического потребления кислорода в течение 5 суток (БПК₅).

В процессе проведения работ непредвиденные внешние факторы (поступление загрязнений) сказались на результатах съемок и не дали возможности проследить воздействие ультразвука во всем временном разрезе. Вместе с тем, окончательный анализ всех материалов позволил прийти к заключению о воздействии ультразвука на цианобактерии, которое, однако, оказалось меньше предполагаемого и об отсутствии его влияния на остальные виды гидробионтов. Более того, основным недостатком ультразвукового устройства являлось то, что оно не могло быть установле-

но скрытно – невидимо для посетителей сада и нуждалось в круглосуточной охране. Отмеченные выше моменты хотя и были установлены с использованием одного типа ультразвуковых устройств, но выявленные закономерности носят, несомненно, общий характер. Учитывая это, ИНОЗ РАН при постановке на водных объектах натуральных экспериментов с применением ультразвука каждый раз считал необходимым осуществление комплексного подхода при постановке наблюдений на водоеме.

Автономная ультразвуковая станция. Используя опубликованные в научной литературе материалы [Wu, Joyce, Mason, 2011], а также результаты собственных проводимых лабораторных и натуральных исследований, в Институте озерадения была разработана концепция автономной ультразвуковой станции, предназначенной для регуляции цианобактериального цветения водоемов. В 2015 г, совместно с Акционерным обществом «Концерн «Океанприбор», была изготовлена и прошла испытания в лабораториях, на стенде и на полигоне автономная ультразвуковая станция для борьбы с «цветением» воды. Основные технические характеристики автономной ультразвуковой станции были следующие: диапазон частот: от 20 кГц до 300 кГц, возможные формы сигналов на выходе – синус, меандр и треугольный. Выходное напряжение на керамическом ультразвуковом излучателе – 80 В, выходной импеданс – 50 Ом. Амплитудно-частотная характеристика станции приведена на рис. 10.5. В качестве источников питания используются встроенные аккумуляторы и солнечные батареи (9В DC/200 мА и модель НН-MONO60W). Вес станции 40 кг, автономность – 3 месяца [Калинникова, Гайнутдинов, Шагидуллин, 2017]

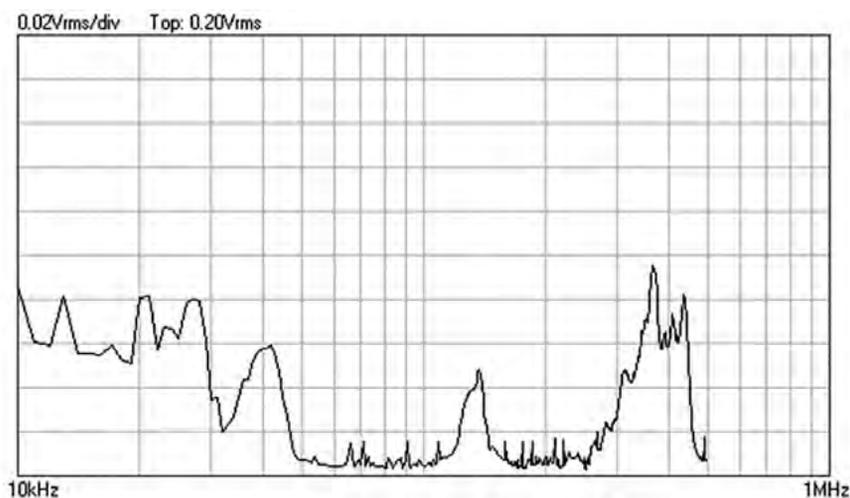


Рис. 10.5. Амплитудно-частотная характеристика излучателя станции

Оригинальный ультразвуковой керамический излучатель станции, в отличие от уже реализованных другими разработчиками конструкциях, имел круговую диаграмму направленности. Этим она принципиально отличается от зарубежных и российских аналогов существующих установок [Калинникова, Гайнутдинов, Шагидуллин, 2017; Киселев, Румянцев, Рыбакин, 2014б]. Размеры эффективно облучаемой акватории достигали 5 гектаров. Особенностью автономной ультразвуковой станции являлось то, что был реализован импульсный режим комбинированного ультразвукового излучения малой интенсивности. Диапазон частот и малая интенсивность ультразвука были выбраны так, что позволяли сохранить все биотические сообщества водоемов. В 2016 г. автономная ультразвуковая станция, предназначенная для борьбы с токсигенным цианобактериальным цветением водоемов, была испытана на Матросском пруду, входящем в систему прудов Московского парка Победы г. Санкт-Петербурга.

Пруды Московского парка Победы были выбраны для проведения натуральных испытаний, поскольку, начиная с 2006 г., на них проводились сезонные гидробиологические и гидрохимические наблюдения. Ниже приведены результаты работ в июне-августе 2016 г. на двух мелководных ландшафтных прудах Московского парка Победы в Санкт-Петербурге: Капитанском (165 x 130 м) и Матросском (116 x 95 м) со средними глубинами 2,5–3,0 м, объединенных между собой узким Детским прудом (рис. 10.6).

Приведенные ранее исследования прудов выявили схожесть не только морфометрических, но и гидрологических, гидрохимических характеристик и донных отложений, а также сопоставимость уровня развития эвтрофных сообществ-фитопланктона, микрофитобентоса и высшей водной растительности. В результате исследований определялись: видовой состав водорослей и цианобактерий, количественные показатели (численность, биомасса), содержание растительных пигментов (хлорофилл-*a*) в воде. Рассчитаны индексы, характеризующие состояние планктонных сообществ. Трофический статус обоих водоемов характеризовался как мезотрофный по фитопланктону и слабозэвтрофный по содержанию хлорофилла-*a*. По гидрохимическим показателям их трофический статус оценивался как эвтрофный. Автономная ультразвуковая станция (АУЗС) была установлена в центре акватории Матросского пруда на глубине пять метров при заглублении излучателя в полтора метра. На рис. 10.7 показан момент установки АУЗС на акватории Матросского пруда.



Рис. 10.6. Карта-схема исследованных прудов и расположения автономной ультразвуковой станции



Рис. 10.7. Установка АУЗС на акватории Матросского пруда в июне 2016 г.

Исследование фитопланктона двух прудов экспериментального Матросского и контрольного Капитанского, включающее изучение видового состава, определение количественных показателей водорослей (численности, биомассы), содержания хлорофилла-*a* в воде, а также расчет индексов, характеризующих состояние планктонных сообществ и трофический статус водоемов в целом, проводилось в июне–августе 2016 г. Уровень развития фитопланктона в экспериментальном Матросском пруду в период исследований изменялся от 0,55 до 11,32 мг/л, составляя в среднем 4,80 мг/л; содержание хлорофилла «а» – от 7,33 до 37,70 мкг/л, в среднем 13,33 мкг/л (рис. 10.8а), что соответствует слабоэвтрофной стадии [Румянцев, Крюков, Рыбакин, Киселев, 2015]. Численность водорослей составляла 7–209 млн кл./л, в среднем 90 млн кл./л. Максимальные значения биомассы отмечались в середине августа и были обусловлены массовым развитием жгутиковых форм из отделов Dinophyta, Cryptophyta и Euglenophyta.

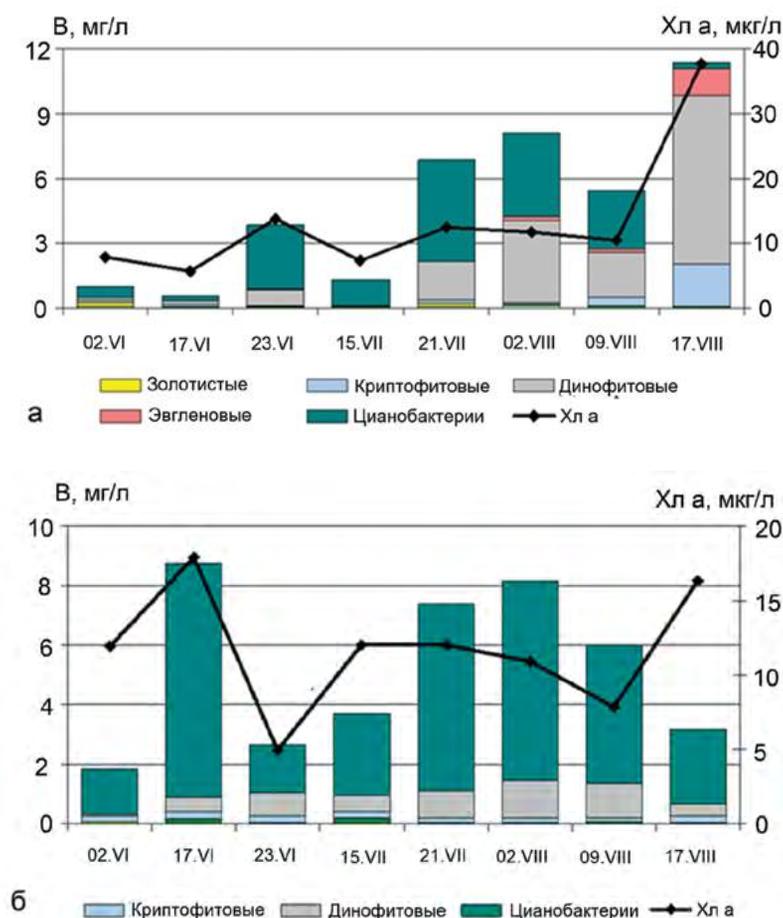


Рис. 10.8. Динамика биомассы фитопланктона (В фито), биомассы *L. redekei* (В *Limnothrix*) и содержание хлорофилла-*a* (Хл «а») в экспериментальном (а) и контрольном (б) прудах, июнь–август 2016 г.

В результате проведенного в июне–августе ультразвукового облучения на экспериментальном Матросском пруду наблюдалось двукратное снижение средней численности планктонных водорослей, в том числе численности *Limnothrix redekei* – в 1,82 раза. На Капитанском пруду было отмечено незначительное возрастание суммарной биомассы фитопланктона (в среднем на 10 %), при этом уровень развития цианобактерий в экспериментальном пруду был в среднем в 2,1 раза ниже. Преобладание в альгоценозах цианобактерий определило резкое снижение видового разнообразия в обоих водоемах. Наиболее заметные отличия сообществ фитопланктона экспериментального и контрольного водоемов были зарегистрированы в середине августа, когда в экспериментальном пруду концентрация цианобактерий снизилась почти в 10 раз по сравнению с контрольным. Наблюдалось постепенное сокращение количества и роли в планктоне в первую очередь нитчатых форм

из родов *Limnothrix* и *Aphanizomenon*, являющихся типичными возбудителями «цветения» в водоемах Северо-Запада России, в течение периода наблюдений вклад *Cyanophyceae* в общую биомассу в Матросском пруду снизился с 78–90 % в июле, до 3 % в середине августа (рис. 10.8). Начиная со второй половины лета, в водоеме возрастало количество подвижных форм, обладающих миксотрофным типом питания, из отделов *Dinophyta*, *Euglenophyta*, *Cryptophyta*.

Таким образом, результаты биологических исследований показали, что численность и биомасса доминирующих видов цианобактерий родов *Limnothrix* и *Aphanizomenon*, после завершения работ, на экспериментальном Матросском пруду была почти в 10 раз ниже, чем на контрольном, Капитанском. Что касается остальных присутствующих на прудах видов гидробионтов, за исключением одного, то на обоих прудах расхождение в показателях находилось в пределах ошибок измерений. Есть основание утверждать, что на эти проанализированные виды ультразвук, по меньшей мере, не оказывал какого-либо заметного влияния. По существу, это означает, что была показана реальная возможность регуляции явления цианобактериального «цветения» воды при условии сохранения видового разнообразия на водоеме. Важно также отметить, что ультразвуковое воздействие приводит к замене цианобактерий на другие виды водорослей. Таким образом, ультразвук избирательно воздействовал на определенные виды водорослей, что с позиции регуляции цианобактериального «цветения» водоемов является альтернативой биологическим методам.

В 2017 г. была разработана концепция скрытно устанавливаемого ультразвукового устройства, способного непрерывно работать в водоеме в течение всего вегетационного периода. Основные положения концепции в настоящее время сформулированы следующим образом:

- Известно, что цианобактерии развиваются циклами, переходя из активной фазы жизнедеятельности в пассивную, опускаясь на дно в виде окинет и цист. При воздействии на них ультразвуком в активной фазе их естественный жизненный цикл нарушается, защитная реакция переводит их в пассивное состояние, вследствие чего развитие процесса цветения водоемов блокируется. Нахождение в пассивном состоянии истощает цианобактерии, поэтому через некоторое время они возвращаются в активную фазу, где снова подвергаются воздействию ультразвука, и процесс повторяется. Успешное подавление цианобактерий в водоемах представляет собой непрерывный процесс, занимающий от одной до трех недель, в течение которых удается воздействовать на несколько «поколений» бактерий, пребывающих в разных фазах своего жизненного цикла. По этой причине ультразвуковое устройство должно быть стационарным и находиться в водоеме в течение всего их вегетационного периода.

- При стационарной установке генератор и излучатель ультразвука должны располагаться в водоеме, большинство из которых являются открытыми и неохраняемыми. Для защиты устройства от кражи, повреждения, нарушения режимов его работы, оно должно устанавливаться в водоем скрытно, чтоб не привлекать внимание посторонних. Этого можно достичь с помощью установки прибора под водой на глубине 1–1,5 м. По этой причине ультразвуковое устройство должно быть герметичным.

- Длительный период воздействия и используемая мощность ультразвукового излучения требует питать устройство с берега от промышленной сети. Для открытых водоемов кабель питания должен быть электробезопасным, что ограничивает подаваемое напряжение в пределах 10–25 В. По этой причине ультразвуковое устройство должно питаться постоянным током напряжением 12–24 В. При таких низких напряжениях ток в кабеле питания может достигать 10 А и более, что делает существенными потери на кабеле питания. Увеличение поперечного сечения жил кабеля существенно увеличивает конечную стоимость конструкции и снижает коэффициент его полезного действия. По этой причине устройство должно поддерживать импульсный режим работы, обеспечивая низкий средний ток и высокую импульсную мощность. Для высокой импульсной мощности устройство должно содержать повышающий источник напряжения.

За период с 2018 по 2021 гг. были изготовлены и испытаны на прудах Санкт-Петербургского Парка Победы несколько вариантов ультразвуковых устройств. Визуальный осмотр одного из таких устройств перед его установкой в Матросский пруд Парка Победы в 2020 г. и контроль уровня акустического сигнала в воде показаны на рис. 10.9. Практически все разработанные ультразвуковые устройства показали способность эффективно воздействовать на цианобактерии и блокировать процесс их «цветения» в экспериментальном Матросском пруду в отличие от контрольного Капитанского пруда.



Рис. 10.9. Работы на Матросском пруду 2020 г.: осмотр контейнера с ультразвуковым излучателем перед его установкой (а), контроль уровня акустического сигнала в воде пруда (б)

В 2022 г., в рамках проведения НИР и осуществления Проекта РИД (Результаты Интеллектуальной Деятельности), выполняемого совместно сотрудниками Лаборатории комплексных проблем лимнологии и Лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН и Отдела прототипирования робототехнических и встраиваемых систем СПИИРАН – СПб ФИЦ РАН была проведена разработка Технического задания, по которому было изготовлено и испытано на Матросском пруду Санкт-Петербургского Парка Победы «Скрытно устанавливаемое стационарное ультразвуковое устройство с круговой диаграммой направленности, предназначенное для борьбы с «цианобактериальным цветением» малых водоемов». Элементы устройства, состоящего из блока питания, питающего кабеля, блока накачки и акустического ультразвукового излучателя в сборе с поплавком, приведены на рис. 10.10. Изготовление и испытания данного ультразвукового устройства были закончены в конце июля, а на Матросский пруд устройство было перенесено в начале августа 2022 г.

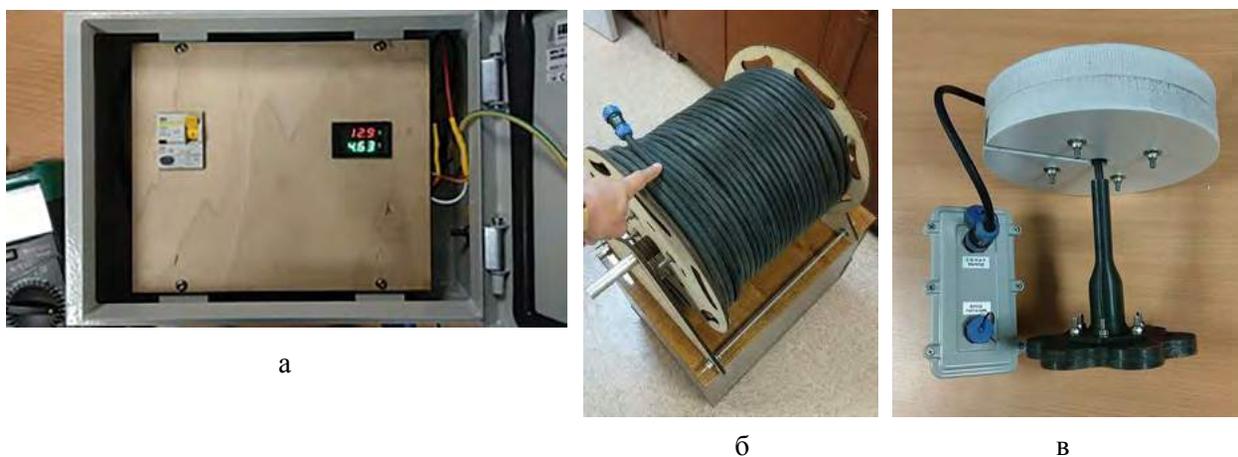


Рис. 10.10. Элементы ультразвукового устройства, испытанного в 2022 году на Матросском пруду Парка Победы: блок питания (а), питающий кабель (б), блок накачки и акустический ультразвуковой излучатель в сборе с поплавком (в)

На берегу соседнего Детского пруда в ангаре был установлен источник питания для ультразвукового устройства. Кабель питания был проложен скрытно по берегу, и далее по дну до места постановки ультразвукового устройства. Схема установки ультразвукового устройства на системе прудов приведена на рис. 10.11.

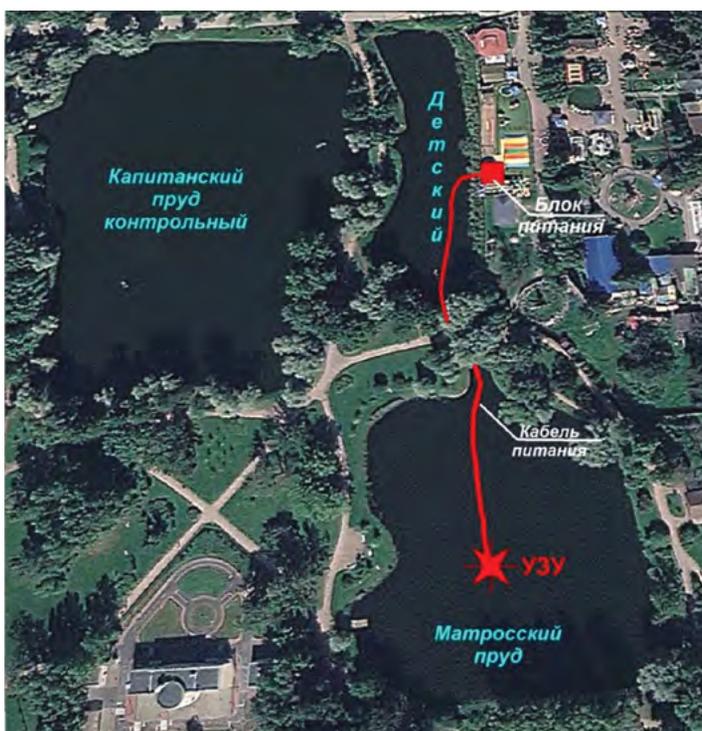


Рис. 10.11. Схема постановки скрытно устанавливаемого ультразвукового устройства на Матросском пруду в 2022 г.

Блок-схема расположения элементов скрытно устанавливаемого ультразвукового устройства непосредственно в пруду приведена на рисунке 10.12. Блок питания, преобразующий переменное напряжение 220 В в напряжение постоянного тока 12–20 В, установлен на берегу, кабель питания 12–20 В проложен по берегу и по дну водоема. Генератор накачки излучателей с кабелем и самим блоком излучателей с поплавком установлен под поверхностью воды на глубине 1–2 м. Донный якорь удерживает все устройство в заданном положении.

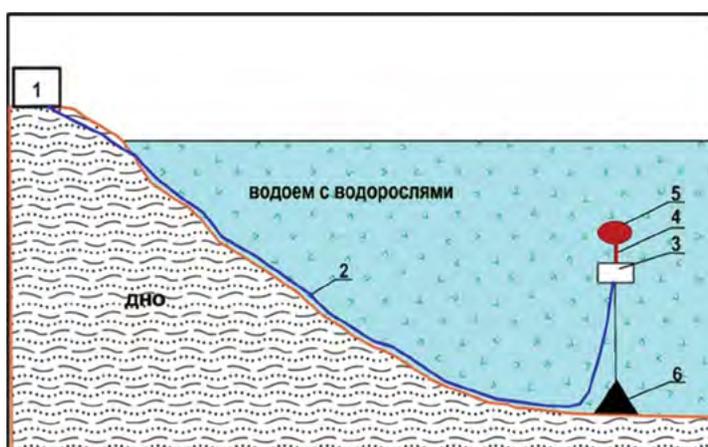


Рис. 10.12. Блок-схема установки элементов, разработанного в 2022 году ультразвукового устройства: 1 – блок питания преобразующий 220 В в 12-20 В, устанавливаемый на берегу; 2 – кабель питания 12-20 В, идущий по дну водоема; 3 – генератор накачки излучателей; 4 – кабель накачки излучателей; 5 – блок излучателей с поплавком, устанавливаемый под поверхностью воды на глубине 1–2 метра; 6 – донный якорь

Скрытно устанавливаемое ультразвуковое устройство работало без сбоев в Матросском пруду Московского Парка Победы с 11 августа по 21 сентября 2022 г. Из приведенных ниже графиков видно, что к началу сентября произошло заметное похолодание, которое сопровождалось ростом общей биомассы водорослей (рис. 10.13). Основной вклад в этот процесс внесли криптофитовые и динофитовые водоросли, на которые ультразвук не действует (рис. 10.14а, б).

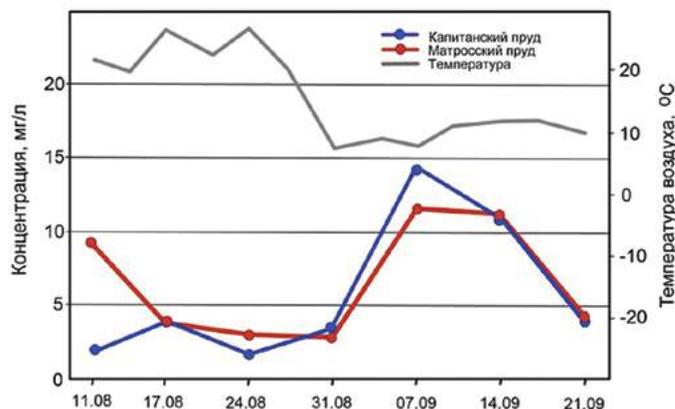


Рис. 10.13. Изменение температуры воздуха и концентрации биомассы водорослей в Матросском и Капитанском прудах в течение эксперимента 2022 г.

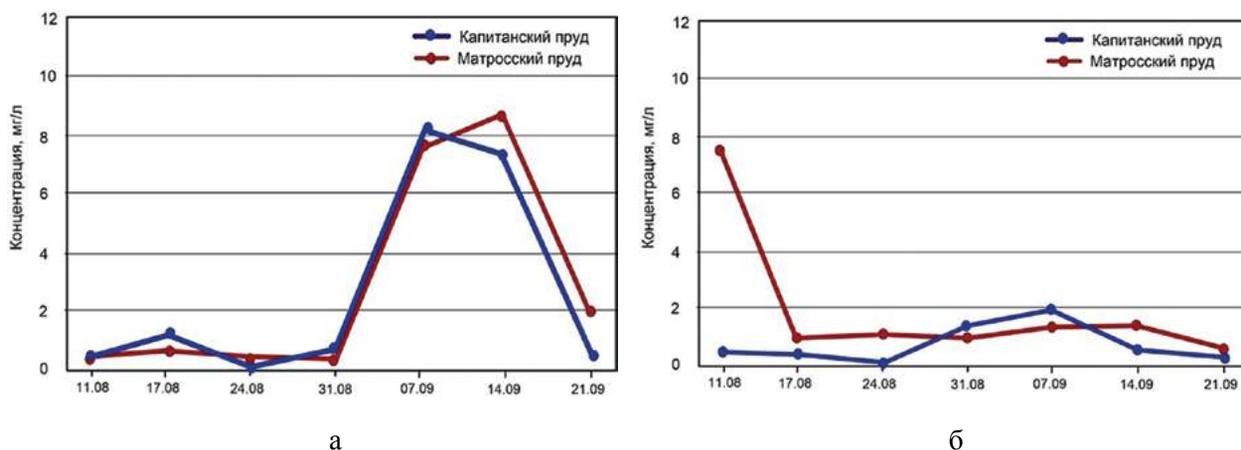


Рис. 10.14. Изменение биомассы криптофитовых (а) и динофитовых (б) водорослей в Матросском и Капитанском прудах в течение эксперимента 2022 г.

В контрольном Капитанском пруду биомасса водорослей возросла от 2 до 14,4 мг/л и в среднем составила 5,9 мг/л. Максимальное значение биомассы так же, как и в Матросском пруду, наблюдалось в начале сентября, что было вызвано развитием криптофитовых водорослей. Численность фитопланктона колебалась от 23 до 69 млн кл./л, составляя в среднем 39 млн кл./л. Основную роль в сложении биомассы в исследуемый период играли цианобактерии, криптофитовые, зеленые и динофитовые (соответственно 27, 24, 21 и 14 % среднесезонного количества) водоросли. Из цианобактерий доминировали виды *Aph. flos-aquae* и *A. planctonica* из криптофитовых – *Cryptomonas sp.*, из зеленых – хлорококковые (*Botryococcus braunii*, *Coelastrum astroideum*, *Monoraphidium contortum*, виды родов *Scenedesmus* и *Pediastrum*), из динофитовых – *P. cinctum*. По численности фитопланктона основное значение имели цианобактерии, составляя 48–76 % от общего количества. Доминировал вид *Limnothrix redekei* (20–48 % от общей численности фитопланктона).

В экспериментальном пруду через две недели после начала работы скрытно устанавливаемого ультразвукового устройства биомасса цианобактерий уменьшилась в пять раз (с 2 до 0,4 мг/л) и практически не изменялась до конца эксперимента (рис. 10.15). В контрольном пруду через неделю биомасса цианобактерий увеличилась в два раза (с 0,7 до 1,4 мг/л) и, на протяжении дальнейшего исследования,

колебалась в районе 0,9–1,5 мг/л. Средняя биомасса цианобактерий в экспериментальном пруду составила 0,7 мг/л, а в контрольном – 1,1 мг/л. Средняя численность цианобактерий в экспериментальном пруду (13 млн кл./л) оказалась в два раза ниже, чем в контрольном (25 млн кл./л).

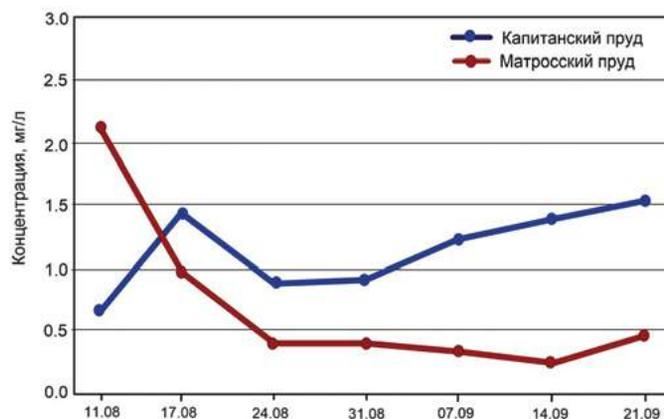


Рис. 10.15. Изменение биомассы цианобактерий в Матросском и Капитанском прудах в течение эксперимента 2022 г.

Таким образом, разработано и испытано в лабораторных и природных условиях скрытно устанавливаемое ультразвуковое устройство для борьбы с цианобактериальным цветением на малом водоеме. Ультразвуковое воздействие малой интенсивности, производимое устройством на биотические сообщества малого водоема, привело к блокировке дальнейшего роста в нем цианобактерий по сравнению с контрольным прудом. Лабораторный анализ биологических проб из прудов полностью подтвердил правильность разработанных и реализованных научно-методических решений. Токсигенные цианобактерии, в силу выявленной у них в ходе лабораторных экспериментов особенностей реакции на стресс, являются менее устойчивыми к воздействию ультразвука по сравнению с нетоксигенными цианобактериями. Поэтому к ним полностью применимы все заключения, сделанные в ходе экспериментальных работ с последними на водоемах. Полученные в ходе выполненных исследований результаты в целом представляют не только научный интерес, но и являются крайне важными с практической точки зрения. Они свидетельствуют о том, что с помощью ультразвука малой интенсивности появилась реальная возможность существенного снижения негативного влияния токсигенных цианобактерий на экологическую обстановку на водоемах и качество их воды. Такая возможность образуется за счет многостороннего характера воздействия ультразвука, включающего прекращение токсигенными цианобактериями выделения в воду токсинов, а также в ослаблении их усилий в борьбе за экологические ниши и пищевые ресурсы с нетоксичными и менее продуктивными видами гидробионтов-антагонистов. Положительный результат действия последнего обстоятельства заключается в снижении рисков забивания цианобактериями входных водозаборных устройств, а также в уменьшении на дне объемов отмерших цианобактерий, при деструкции которых в водоемах возникают заморные зоны с гибелью рыбы.

В 2023 г. проведены работы с созданным ультразвуковым устройством и его модернизированными вариантами на нескольких известных водоемах в течение всего вегетационного периода развития цианобактерий, которые подтвердили полученные ранее результаты.

Активное участие в проведении изложенных выше исследований принимали: академик РАН В.А. Румянцев, д.х.н. Л.Н. Крюков, д.м.н. В.Д. Тонкопий, к.б.н. О.А. Павлова, к.т.н. Н.Ю. Григорьева, к.б.н. И.В. Рудской, к.б.н. Л.Л. Капустина, к.б.н. Г.Г. Митрукова, к.б.н. А.О. Загребин, м.н.с. Е.Ю. Киселев, вед. инж. А.Н. Коровин, вед. инж. Н.В. Надеждина, вед. инж. Е.В. Протопопова. По результатам выполненной аппаратной разработки, проведенных природных исследований и полученным результатам, в 2023 г. в СПб ФИЦ РАН подготовлена заявка на изобретение «Скрытно устанавливаемое стационарное ультразвуковое устройство с круговой диаграммой направленности, предназначенное для борьбы с «цианобактериальным цветением» малых водоемов», авторы В.П. Дашевский, А.Н. Коровин, В.Н. Рыбакин.

Глава 11

РАБОТЫ ПО КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА И НАНОЧАСТИЦ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

К числу специфических аспектов возможного негативного воздействия на водные объекты, которым уделяется существенное внимание в исследованиях Института озерадения за последние годы, относится количественная оценка содержания микропластика и мельчайших фракций взвешенных частиц, находящихся в высокодисперсном или коллоидном состоянии (наночастиц) в водной массе и донных отложениях.

Загрязнение окружающей среды пластиком в настоящее время является одной из глобальных проблем человечества. Под пластиком в широком смысле слова понимаются искусственно синтезированные высокомолекулярные соединения (полимеры). Они представляют собой различные виды пластмасс, резин, синтетических тканей. Пластик является легким, дешевым, долговечным и биоинертным материалом и повсеместно используется при изготовлении широкого спектра товаров, в связи с чем его глобальное производство экспоненциально растет с момента начала его производства в 1950-х гг. [Plastics and the microbiome..., 2021]. Впервые на проблему пластикового загрязнения водной среды обратили внимание в 70-х гг. XX века [Carpenter, Smith, 1972; Colton, Knapp, Burns, 1974]. С тех пор исследования данной проблемы активно проводятся многими научными группами по всему миру. По данным отчета программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП), пластик составляет не менее 85 % от всего морского мусора, а в Мировом океане находится 75–199 млн тонн пластика [UNEP, 2021]. Пресноводные водотоки являются одним из основных путей переноса частиц пластика с суши в Мировой океан.

Термин микропластик был впервые предложен в 2004 г. британскими учеными [Lost at sea..., 2004]. Под микропластиком традиционно понимают частицы пластика менее 5 мм [GESAMP, 2015]. Разделяют первичный и вторичный микропластик. Первичный микропластик – это исходный материал (в основном гранулы), который используется при производстве различных изделий [UNEP, 2016]. Вторичный микропластик образуется в природной среде в результате разрушения крупных фрагментов пластика до микрочастиц под воздействием солнечной радиации, ветров, волновой активности, процессов биодеградации [Andrady, 2011]. Кроме того, в отдельную категорию выделяют нанопластик. Под нанопластиком понимают как частицы меньше 100 нм [Koelmans, Besseling, Shim, 2015], так и меньше 1000 нм (1 мкм) [Cole, Galloway, 2015; Current opinion..., 2018]. Интерес к данной проблеме обусловлен потенциальным негативным влиянием микропластика на водные экосистемы. Микропластик может содержать различные токсичные добавки [An overview of chemical..., 2018], а также сорбировать на себя стойкие органические загрязнители [UNEP, 2016] и тяжелые металлы [Ashton, Holmes, Turner, 2010; Holmes, Turner, Thompson, 2012]. Многие исследования подтверждают негативное воздействие микропластика на функционирование живых организмов [Studies of the effects of microplastics..., 2018; A Detailed Review Study..., 2020; Yuan, Rajat, 2022].

В 2018 г. в Институте озерадения РАН по инициативе директора д.г.н. Шамиля Рауфовича Позднякова были начаты исследования содержания и характеристик микропластика в Ладожском озере и на его притоках, а также в Финском заливе Балтийского моря. В 2019–2023 гг. работы были продолжены в рамках темы НИР FMNG-2019-0003 «Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки».

Исследование проб воды, пляжных и донных отложений Невской губы Финского залива в 2018–2019 гг. показало, что основным источником загрязнения микропластиком Невской губы является река Нева и городская территория Санкт-Петербурга. При впадении Невы в Финский залив происходит разбавление загрязненных вод и дальнейший транзит загрязнителей, в том числе частиц микропластика, в соответствии с господствующим гидродинамическим переносом в западном направлении [Studying the Concentration of Microplastic..., 2020]. По мере удаления от г. Санкт-Петербурга и устья Невы зафиксировано уменьшение концентраций микропластика в отложениях. Наибольшие концентрации частиц в донных грунтах и песчаных отложениях зафиксированы

в районе Парка 300-летия Санкт-Петербурга. В поверхностном слое водной толщи наибольшие значения наблюдаются на южном побережье Невской губы.

В Ладожском озере были проведены исследования содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи и в донных отложениях, начаты работы по анализу вертикального распределения микропластика в водной толще озера с учетом гидрологических условий. В 2021 г. проведены совместные работы с научными группами из Финляндии, Эстонии и России по интеркалибрации методов подготовки проб донных отложений для последующего анализа на содержание микропластика. С российской стороны в исследованиях приняли участие научная группа из Института озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (руководитель к.г.н. Е.В. Иванова) и лаборатория ПластикЛаб РГГМУ (рук. А.А. Ершова). Результаты работ показали, что различная лабораторная подготовка проб может влиять на эффективность экстракции микропластика из отложений. В этой связи были проведены дополнительные исследования по сравнению разных методов лабораторного анализа.

В связи с отсутствием стандартных унифицированных методик анализа сравнение полученных результатов между разными научными группами вызывает ряд сложностей. Проведение интеркалибраций методик с оценкой эффективности экстракции микропластика из проб разными методами является необходимым этапом дальнейшего развития исследований в данной области.

Отбор проб воды и донных отложений. Пробы воды и донных отложений в Ладожском озере отбирались в 2018–2022 гг. с борта научно-исследовательских судов «Эколог» и «Посейдон». Для отбора проб воды с различных глубин использовалась разработанная в ИНОЗ РАН специальная фильтровальная установка (рис. 11.1) [Опыт использования фильтрационной..., 2021].

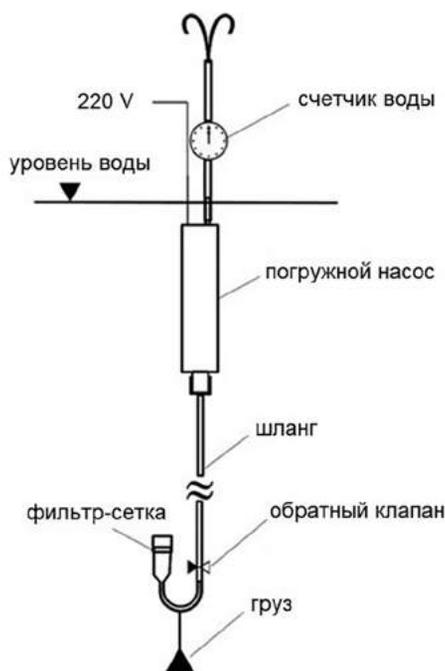


Рис.11.1. Фильтрационная установка для отбора проб воды с разных глубин [Опыт использования фильтрационной..., 2021]

Внутри данной установки помещается сетка с размером ячейки 60–100 мкм. Далее установка опускается на необходимую глубину с помощью шланга, к которому крепится погружной вибрационный насос. Для предотвращения вымывания пробы при подъеме устройства в данной конструкции предусмотрен обратный клапан. Вода фильтруется через сетку до тех пор, пока скорость фильтрации существенно не замедлится из-за забивания сетки планктоном и взвесью, после чего сетка вынимается из установки и помещается в емкость с дистиллированной водой. При отборе проб в водной толще параллельно проводились измерения вертикального распределения температур

для последующего анализа распределений микропластика в условиях прямой плотностной стратификации или при гомотермии. Пробы донных отложений отбирались с помощью дночерпателя Экмана-Берджа. Для анализа берутся верхние слои донных отложений (до 5 см), которые помещаются в стеклянные банки.

Лабораторная подготовка проб к анализу. Для удаления лишнего органического материала в пробах воды отфильтрованный материал смывался с сетки в колбу, куда добавлялся реактив Фентона (30 % раствор перекиси водорода и Fe(II) катализатор) по выбранной методике [Masura, Baker, Foster, Arthur, 2015]. Пробы выдерживались на водяной или песчаной бане при температуре 75°C в течение 40–60 минут, после чего отстаивались сутки [Zobkov, Esiukova, 2017]. Далее жидкость фильтровалась через металлическую сетку в 60 мкм, а осадок на ней смывался на чашку Петри дистиллированной водой.

Для подготовки проб донных отложений к анализу использовалась методика NOAA [Masura, Baker, Foster, Arthur, 2015] с некоторыми изменениями: для плотностного отделения микропластика от донных отложений применялся раствор $ZnCl_2$, а для фильтрования жидкостей использовалась металлическая сетка в 60 мкм для задерживания мелких частиц. Сначала пробы подсушивались при комнатной температуре или в сушильном шкафу при 55°C для удаления излишней влаги. Для последующего определения абсолютно сухого веса пробы 10 грамм воздушно-сухие отложения высушивались при 105°C. Подсушенные отложения (400 г) дважды отстаивались в 55 % растворе $ZnCl_2$ в течение суток. Вся надосадочная жидкость фильтровалась через металлическую сетку 60 мкм. Аналогично с пробами воды, отфильтрованный материал смывался дистиллированной водой с сетки в колбу, куда добавлялся реактив Фентона в пропорциях 1:1 с пробой, после чего колба выдерживалась при 75°C бане в течение 40–60 минут [Zobkov, Esiukova, 2017]. После растворения излишнего органического материала проба снова фильтровалась через сетку в 60 мкм, а осадок смывался раствором NaCl

в стакан и далее помещался в пробирки для повторного плотностного отделения в центрифуге в течение 3 минут на скорости 3000 об/мин. Затем надосадочная жидкость снова фильтровалась через металлическую сетку и отфильтрованный материал тщательно промывался дистиллированной водой, после чего смывался на чашку Петри.

Для сравнения эффективности используемых методик лабораторного анализа был проведен ряд экспериментов. Отделение частиц микропластика от основного осадка выполнялось методом отстаивания в термостакане и с использованием специальной установки с шаровым краном [A small-scale, portable..., 2017] (рис. 11.2). Для контроля возможных потерь частиц на этапе пробоподготовки в пробы добавлялись специальные маркеры – 20 гранул полистирола, легко идентифицируемых под микроскопом и отличных от остальных частиц. Они подсчитывались после завершения всех этапов лабораторной обработки проб.

Визуальная идентификация частиц проводилась при помощи оптического микроскопа Euler Professor 770T с увеличением 40x и 100x для определения формы, размера и цвета частиц. Для визуального отделения микропластика от органического и минерального материала в пробе использовались общепринятые критерии: отсутствие клеточной структуры, единообразная толщина и цвет частиц [Guide to Microplastic ..., 2015]. После предварительной идентификации на оптическом микроскопе наиболее крупные частицы пластика ана-



Рис. 11.2. Установка с шаровым краном для экстракции микропластика из донных отложений путем плотностного отделения

лизировались с помощью рамановского спектрометра Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800, предоставленного Ресурсным центром «Геомодель» СПбГУ.

При лабораторной обработке проб проводился контроль внешнего загрязнения. Перед началом плотностного отстаивания отложений раствор $ZnCl_2$ дополнительно фильтровался, а посуда и сетки тщательно промывались дистиллированной водой. Одновременно с основными пробами проводился анализ холостых проб (по одной холостой пробе для ряда проб, отобранных в одной точке) аналогичным методом. Для холостых проб воды использовалась дистиллированная вода, для холостых проб донных отложений – раствор $ZnCl_2$. При анализе холостой пробы подсчитывались частицы, попадающие в образец в результате побочного загрязнения.

При исследовании горизонтального распределения микропластика в поверхностном слое водной толщи более высокие содержания были зафиксированы в местах впадения рек Янисйоки и Вуокса – 144 и 109 частиц/м³, у истока реки Нева – 93 частицы/м³, а также у г. Приозерск – 160 частиц/м³ и г. Питкяранта – 353 частицы/м³. Разброс значений содержаний микропластика в поверхностном слое водной толщи составил 18–353 частицы/м³ (рис. 11.3). Среднее содержание частиц микропластика в поверхностном слое воды составило 83 ± 86 частиц/м³ с медианой в 54 частицы/м³ [Иванова, Тихонова, 2022].



Рис. 11.3. Содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера (частиц/м³) [Иванова, Тихонова, 2022]

С 2021 г. научной группой ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (Екатерина Викторовна Иванова, Дарья Алексеевна Тихонова, Сергей Германович Каретников) начаты работы по исследованию вертикального распределения частиц микропластика в водной толще Ладожского озера в различные гидрологические сезоны. Для этого оценивается распределение микропластика при различных гидрологических условиях: плотностной стратификации с наличием слоя температурного скачка и гомотермии. Оценка содержания частиц микропластика на различных глубинах водной толщи – важное дополнение к исследованиям, проводимым в поверхностном слое воды. Частицы микропластика со временем оседают в водной толще в связи с образованием на них биопленок, влияющих на их плавучесть [The effect of particle properties..., 2017; Kaiser, Kowalski, Waniek, 2017], а также из-за разной плотности частиц. Выводы, основанные на анализе данных, полученных по результатам наблюдений только поверхностного слоя, могут привести к недочёту общего содержания микропластика в водном объекте.

При анализе содержаний микропластика в донных отложениях исследовалось как пространственное распределение значений, так и различия в содержаниях микропластика в отложениях с разным гранулометрическим составом (ил/песок). Максимальные концентрации зафиксированы вблизи города Питкяранта (90 частиц/кг с. в.), а также вблизи шхерных районов северной части Ладожского озера (51–53 частиц/кг с. в.). Минимальные концентрации наблюдаются в юго-западной части озера (8–17 частиц/кг с. в.) (рис. 11.4). На основе полученных данных среднее содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера составило 30 ± 18 частиц/кг с. в. с медианой в 25 частиц/кг с. в. [Иванова, Тихонова, 2022].

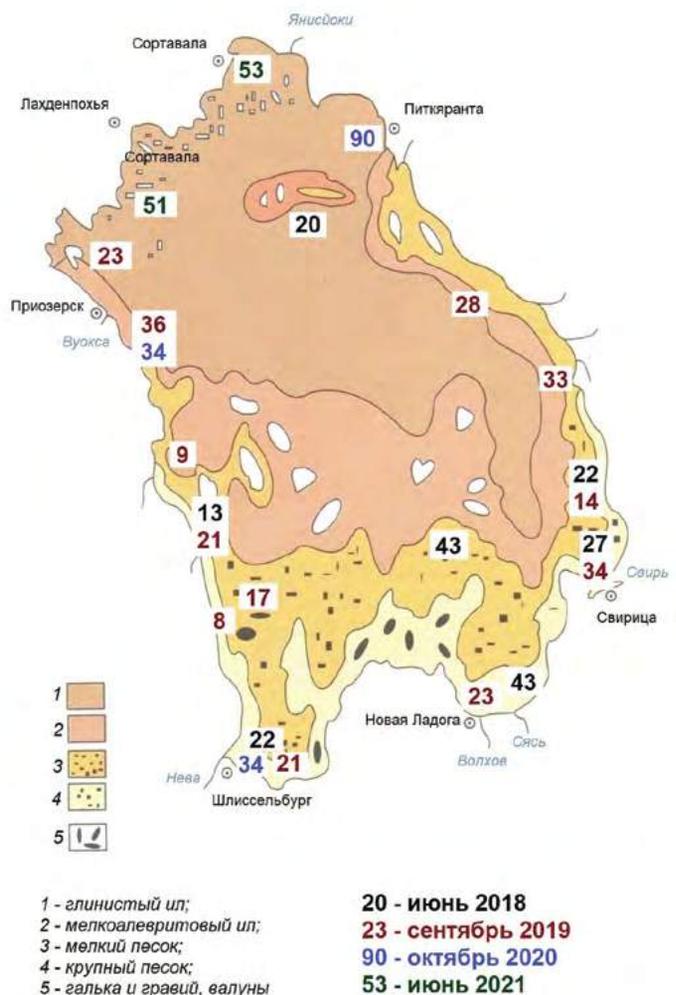


Рис. 11.4. Содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера (частиц/кг сухого веса) [Иванова, Тихонова, 2022]

Кроме этого, было проанализировано влияние гранулометрического состава донных отложений Ладожского озера на содержание в них частиц микропластика. В анализируемых пробах для илистых грунтов концентрации микропластика были немного выше, чем для песчаных, (рис. 11.5), однако статистический анализ не показал значимых различий (U-критерий Манна-Уитни, $p = 0.13$).

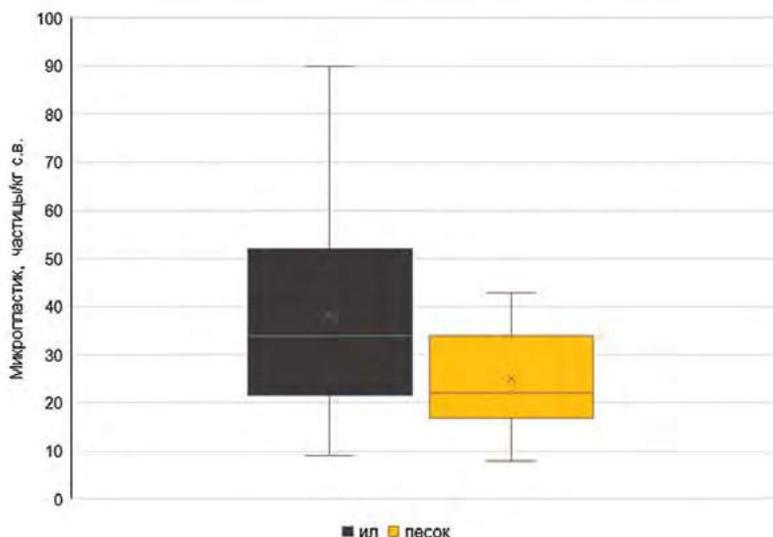


Рис. 11.5. Распределения содержаний частиц микропластика в илистых и песчаных отложениях Ладожского озера (2018–2022)

По результатам сравнения двух методик эффективность использования термостакана для плотного отделения микропластика от отложений составила 68 %, а при использовании специальной установки – 73 %. Однако исследования, выполненные другими научными группами [A small-scale, portable..., 2017; Vermeiren, Muñoz, Ikejima, 2020], подтвердили, что эффективность данной установки является довольно высокой (80–96 %). Будут проведены дальнейшие работы по оценке эффективности различных методик на большем количестве проб.

По форме частиц, преобладающее количество микропластика зафиксировано в виде волокон (94 %). Также присутствовали пленки (4 %) и фрагменты (2 %). В донных отложениях Ладожского озера содержание волокон составило 99 %, фрагменты практически не встречались (1 %) (рис. 11.6).

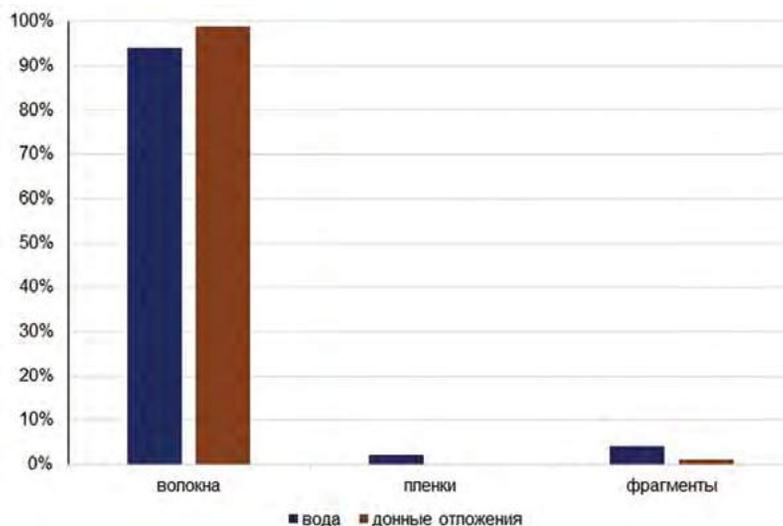


Рис. 11.6. Диаграмма распределения микропластика по форме частиц в воде и донных отложениях в Ладожском озере (2018 –2022)

По размерам в водной толще большинство частиц находится в диапазоне от 60 до 1000 мкм (59–62 %). Количество частиц микропластика увеличивается с уменьшением их размера (рис. 11.7).

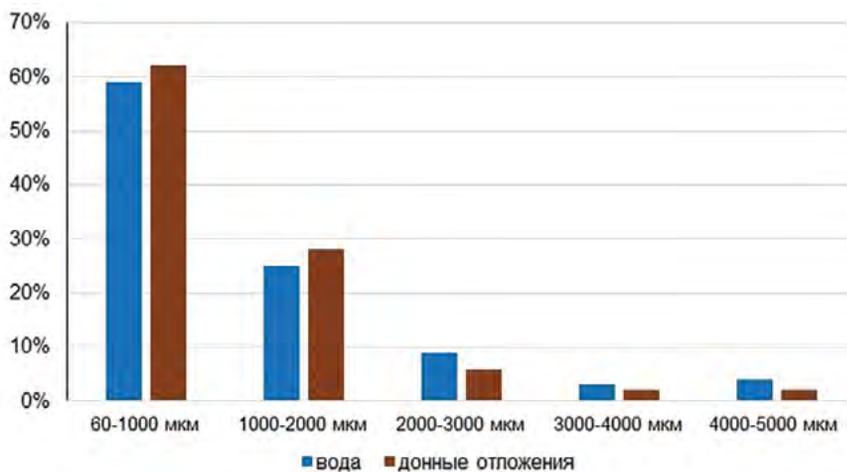


Рис. 11.7. Диаграмма распределения микропластика по размеру частиц в воде и донных отложениях в Ладожском озере (2018–2022)

В Ладожском озере были обнаружены такие типы полимеров, как полиэтилентерефталат (полиэстер), полипропилен, полиамид, полиэтилен (как высокой, так и низкой плотности), полистирол, полиакрилаты.

Основные результаты исследований. Наибольшее содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера зафиксировано вблизи урбанизированных территорий (Приозерск, Питкяранта), а также в местах впадения некоторых рек (Вуокса, Янисйоки). Полученные результаты на данный момент не позволяют выявить четкие закономерности горизонтального распределения частиц микропластика в поверхностном слое водной толщи озера. Для донных отложений наибольшие значения зафиксированы недалеко от города Питкяранта. Получена информация о содержании и распределении микрочастиц пластика в Ладожском озере и Финском заливе. Проанализировано пространственное распределение концентрации микрочастиц пластика в различных средах водных экосистем, таких как водная толща, прибрежные грунты и донные отложения. Выявлены основные формы частиц, диапазон размеров и концентрации.

Сравнивая полученные значения концентрации частиц микропластика в Ладожском озере с результатами исследований, проведенных на акватории Финского залива, можно сделать выводы о более высокой степени загрязнения залива пластиковыми частицами в сравнении с Ладожским озером. Концентрация микропластика в донных отложениях Финского залива в среднем в 2 и более раз превышает концентрации в Ладоге. Полученные результаты представляют интерес для последующего анализа путей транспортировки и трансформации частиц пластика в водных объектах.

Результаты, полученные различными научными группами, зачастую мало сопоставимы вследствие использования разных методик отбора и анализа проб. В этой связи необходимо проведение интеркалибрации методик отбора и лабораторной обработки проб для возможностей сопоставления результатов и оценки эффективности методик. Также необходимо использование дополнительных методов оценки эффективности методик, таких как добавление в пробу определенных маркеров – частиц микропластика, легко идентифицируемых под микроскопом и отличных от остальных частиц, и дальнейшего их подсчета для контроля качества экстракции микропластика из проб. Важной составляющей является тщательный контроль внешнего загрязнения на всех стадиях исследования.

В дальнейшем научная группа ИНОЗ РАН планирует изучение механизмов поведения микропластика в водной толще с учетом различных гидрологических факторов, в том числе исследование вертикального распределения микропластика при наличии слоя температурного скачка и в условиях гомотермии, а также с учетом плотностных характеристик анализируемых частиц. Планируется

проведение анализа пространственно- временной динамики концентраций частиц микропластика в Ладожском озере и его притоках с выявлением основных потенциальных источников пластикового загрязнения исследуемых водных объектов.

Количественная оценка содержания мельчайших фракций взвешенных наносов в водной массе и донных отложениях. Как показали исследования ИНОЗ РАН, выполненные в 2010–2020 гг., для оценки процессов переноса и накопления загрязнений в донных отложениях важно иметь информацию о гранулометрическом составе мельчайших фракций донных отложений размером менее 0,001 мм [Поздняков, 2012]. Это обстоятельство связано с тем, что чем меньше крупность наносов, тем большее воздействие они могут оказывать на процессы загрязнения водоемов. При уменьшении среднего диаметра частиц при переходе от одного диапазона частиц наносов к другому площадь удельной поверхности в единице объема изменяется практически на порядок. Таким образом, мельчайшие частицы взвешенных наносов способны переносить существенно больше сорбированных на их поверхности веществ. Частицы наносов размерами от 1 мкм до 1 нм относятся к так называемым высокодисперсным или коллоидным системам. Вещества же в коллоидном состоянии приобретают своеобразные свойства. Связано это с тем, что в таком состоянии значительная доля от всех молекул или атомов, составляющих вещество, находится на поверхности раздела фаз (твердой и жидкой). Молекулы приобретают особые свойства не только по своему положению в несимметричном силовом поле, но и по своему энергетическому состоянию. Как отмечается в ряде исследований, поведение всех структур диаметром менее 50 нм обусловлено, скорее, законами квантовой, нежели классической физики. Например, у таких частиц металлической природы заметно выше твердость и электропроводность, а температура плавления на несколько сотен градусов ниже, чем у традиционных порошковых металлов. Натурные исследования показали, что частицы наносов размером менее 0,002 мм достаточно широко представлены в центральной и северной частях Ладожского озера, причем на некоторых станциях их количество превышает 30–40 % от общего состава наносов [Поздняков, 2012]. При исследовании образцов донных отложений под микроскопом основной фон составляли тонкие глинистые частицы, частицы кварца и органического детрита, обломочная слюда и др.

В качестве основного объекта исследований выбрано Ладожское озеро. Под руководством д.г.н. Шамиля Рауфовича Позднякова проведены исследования гранулометрического состава донных отложений и взвешенных наносов Ладожского озера во всем диапазоне гетерогенной дисперсной системы, включая предлагаемую фракцию коллоидов. Выполнены отборы проб донных отложений на акватории Ладожского озера при проведении специализированных экспедиционных работ на научно-исследовательском судне «Талан». Отборы проб осуществлялись с использованием утяжеленного дночерпателя Петерсона (рис. 11.7), грунтовой трубки ГОИН ТГ-1.5, дночерпателя Экмана-Берджи



Рис. 11.8. Поздняков Ш.Р. работает с утяжеленным дночерпателем Петерсона

или автоматического коробчатого дночерпателя ДАК-250. Использование того или иного устройства для отбора проб принималось на каждой станции измерений индивидуально в зависимости от крупности донных отложений. Что касается водной массы, то для определения гранулометрического состава взвешенных наносов отборы проб воды выполнялись стандартным способом путем использования батометра Молчанова. Места отборов проб были организованы таким образом, чтобы охватить наблюдениями все наиболее характерные в морфометрическом отношении особенности ложа водоема.

В результате впервые были получены схемы пространственного распределения процентного содержания частиц субмикронных размеров в донных отложениях. Пример схемы распределения процентного содержания частиц донных отложений Ладожского озера крупностью менее 100 нм представлен на рис. 11.9. Также впервые была получена схема распределения плотности донных отложений Ладожского озера, приведенная на рис. 11.10.

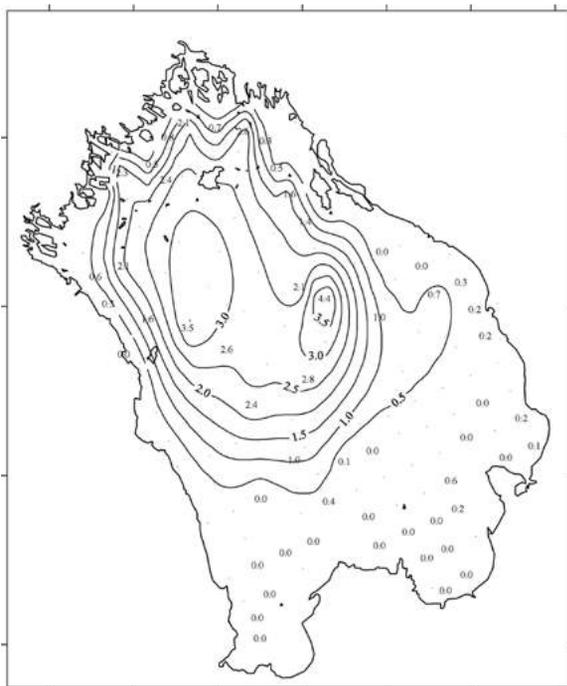


Рис. 11.9. Карта-схема процентного содержания частиц донных отложений Ладожского озера крупностью менее 100 нм

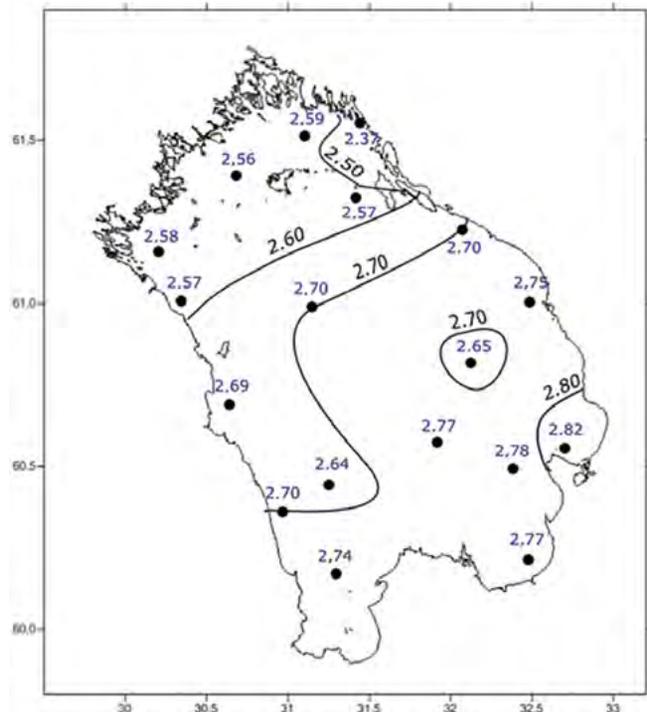


Рис. 11.10. Карта-схема распределения плотности донных отложений Ладожского озера

На основании анализа результатов проведенных работ сделаны следующие выводы [Поздняков, 2012; Ладога, 213]:

- Характер распределения крупности частиц при последовательном переходе от фракции к фракции качественно сохраняется практически во всем диапазоне размеров вплоть до фракции коллоидов – имеет место уменьшение размеров частиц при движении с юга на север. Крупность донных отложений уменьшается к центру водоема к зоне больших глубин, аналогично тому распределению, которое характерно для морей.
- Зоны аккумуляции донных отложений со значительным содержанием частиц в диапазоне фракции коллоидов (по предлагаемой классификации) сосредоточены преимущественно в центральном районе с некоторым смещением к северо-западу и в северной части, примыкающей к Западному архипелагу и к району акватории севернее острова Валаам.
- Содержание частиц мельче 1 мкм в зонах аккумуляции мельчайших донных отложений может достигать до 30 % от общего состава.
- В переходной и глубоководной частях озера повсеместно присутствуют частицы размером менее 200 нм. При этом доля таких частиц увеличивается от 1 % до 9 % к центру озера.

- Наиболее мелкие донные отложения сосредоточены в зонах повышенных глубин к западу и к востоку от центральной части озера, при этом доля мельчайших частиц размером менее 100 нм доходит до 4–5 % от общего состава наносов.
- Минимальные значения крупности донных отложений Ладожского озера доходят до размеров менее 50 нм, при этом доля этих частиц может составлять до 10 % от состава частиц фракции коллоидов и до почти 1 % общего состава донных отложений на конкретных станциях в зоне распространения таких наносов.
- Средневзвешенная крупность донных отложений лежит в диапазоне от 2 до 0,001 мм, т.е. при анализе крупности в существовавшем ранее стандартном диапазоне размеров в отдельных районах Ладожского озера дифференцированными измерениями охватывалась практически лишь половина общего состава наносов.
- Сортированность донных отложений Ладожского озера возрастает при движении к юго-восточной части. Частицы являются наиболее однородными в зоне распространения крупных наносов.
- При современных исследованиях наносов в естественных водных объектах необходимо выполнение анализов во всем диапазоне возможных размеров гетерогенной системы, встречающейся в реках, озерах и водохранилищах, т.е. начиная с размера 1 нм.

Глава 12

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН

Эффективным средством расширения возможностей наук о Земле является моделирование, представляющее собой формализованное представление имеющихся знаний об изучаемых процессах и системах различными способами. Использование моделей позволяет осуществить выход за пределы натурального эксперимента, во много раз сократить сроки и стоимость исследований, число занятых специалистов, повысить обоснованность принимаемых решений. Активизация работ, связанных с моделированием, в Институте началась после прихода в 1982 г. Владислава Александровича Румянцева, являвшегося на тот момент одним из крупнейших отечественных специалистов в области гидрологического моделирования. По его инициативе совместно с Игорем Васильевичем Бовыкиным, а затем с Юрием Александровичем Трапезниковым проводились исследования по разработке и совершенствованию методов стохастического моделирования лимнологических процессов. Физическое и гидродинамическое моделирование развивалось в Лаборатории физического моделирования, возглавляемой Константином Дмитриевичем Крейманом, а также в Лаборатории гидрофизики, возглавляемой Леонардом Амаяковичем Оганесяном. В этой лаборатории работали такие выдающиеся ученые, как Сергей Сергеевич Зилитинкевич, Леонид Айзикович Руховец, Геннадий Петрович Астраханцев. В 1991 г. создана Лаборатория математического моделирования, заведующим которой стал Сергей Васильевич Грибин. В 2013 г. образована Лаборатория математических методов моделирования, возглавляемая Сергеем Алексеевичем Кондратьевым и успешно функционирующая до настоящего времени.

Стохастическое моделирование. По характеру исходных данных и результатов предсказания, математические модели в свою очередь могут быть разделены на вероятностно-статистические (стохастические) и детерминистические. Вероятностно-статистические или стохастические модели основаны на статистической информации, а предсказания, полученные с их помощью, имеют вероятностный характер. На начальных этапах развития этого направления моделирования в ИНОЗ РАН исследована временная статистическая структура межгодовых колебаний годового речного стока, показана связь годового стока с характеристиками физико-географического ландшафта, предложены параметрические модели случайных процессов для описания и долгосрочного прогноза годового стока, создана методика расчёта временных характеристик группировок годового стока и на её основе раскрыты закономерности пространственного распределения характеристик группировок по территории Евразии и дана им физико-географическая интерпретация. Это направление исследований в основном представлено в работе [Румянцев, Бовыкин, 1985]. Дальнейшее развитие методов стохастического моделирования проходило по следующим направлениям.

- Совершенствование методов идентификации стохастических моделей [Румянцев, Трапезников, 2008; Румянцев, Бовыкин, 2009].
- Разработка моделей стационарных случайных процессов [Румянцев, Бовыкин, 1985].
- Разработка моделей совокупности стационарных случайных процессов [Румянцев, Бовыкин, 2009].
- Разработка моделей нестационарных случайных процессов [Румянцев, Трапезников, 2008].
- Разработка стохастических моделей динамических систем [Румянцев, Трапезников, 2008; Румянцев, Трапезников, Григорьев, 2001].

В 2013 г. В.А. Румянцев, Ю.А. Трапезников и И.В. Бовыкин за серию научных работ «Стохастические методы в гидрологии» удостоены **премии имени Ф.П. Саваренского**, присуждаемой РАН за выдающиеся работы в области исследований вод суши.

Физическое или лабораторное моделирование было представлено гидродинамическим лабораторным комплексом для исследования процессов турбулентного вовлечения в озерах «Аэрогидроканал». На Лимнологической станции Института в конце 80-х–начале 90-х гг. прошлого века сконструирована и изготовлена уникальная измерительная система, предназначенная для исследования широкого спектра гидротермодинамических процессов в водной среде. Экспериментальный ком-

плекс, получивший название «Аэрогидроканал», позволял исследовать процессы взаимодействия атмосферы и водной подстилающей поверхности, формирования верхнего перемешанного слоя, а также процессы турбулентного вовлечения в стратифицированной водной среде. «Аэрогидроканал» представлял собой гидравлический лоток длиной более 20 м, состоящий из чередующихся прямолинейных и криволинейных участков, снабженных направляющими пластинами и сотовыми выпрямителями воздушного потока (рис. 12.1).

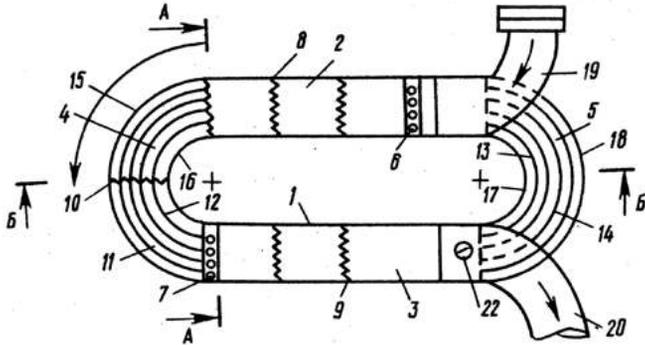


Рис. 12.1. Схематическое изображение установки «Аэрогидроканал»

Главная отличительная особенность «Аэрогидроканала» по сравнению с аналогичными отечественными и зарубежными установками состояла в том, что его конструкция позволяла подавить возникающие в замкнутых каналах паразитарные вторичные циркуляции водной массы. Уникальность «Аэрогидроканала» подтверждена авторским свидетельством (рис. 12.2). Результаты экспериментов на установке опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях [Крейман, 1988].

Детерминистическое моделирование активно начало развиваться в Институте с середины 80-х годов прошлого столетия. В 1986 г. была разработана одномерная нестационарная модель термического режима и условий перемешивания в озере, названная в соответствии с аббревиатурой Института озерадения «ИНОЗ», которая применена для составления прогноза возможных изменений гидротермодинамического режима озера Севан, вызванных планируемым искусственным подъемом уровня [Румянцев, Разумов, Зилитинкевич, 1986]. В дальнейшем модель многократно усовершенствовалась и уже в начале 1990-х гг. специалисты ИНОЗ РАН с новой версией модели, получившей название TEMIX (Temperature and Mixing), становятся участниками международного научного сотрудничества. На тот момент в модели были сконцентрированы практически все последние мировые достижения в области физической лимнологии. В результате в 1991 г. во всемирно известном издательстве Springer-Verlag под редакцией С.С. Зилитинкевича была опубликована монография сотрудников Института озерадения, посвященная моделированию взаимодействия озер с атмосферой [Modeling Air-Lake Interaction..., 1991] (рис. 12.3). Помимо того, что данная публикация дала возможность мировой научной общественности ознакомиться с достижениями советской/российской лимнологической школы, монография имела своей целью конкретную миссию, а именно – усовершенствование Финско-Эстонской модели водной экосистемы FINEST в части описания в ней гидротермодинамических процессов, происходящих в озерах.

В дальнейшем модель TEMIX широко применялась для описания годового цикла термического режима разнотипных озер, расположенных в различных географических зонах умеренных широт северного полушария. Модель была успешно применена для описания термического режима центральной части Ладожского озера, где глубины не превышают 50-ти метров.



Рис. 12.2. Авторское свидетельство на установку «Аэрогидроканал»

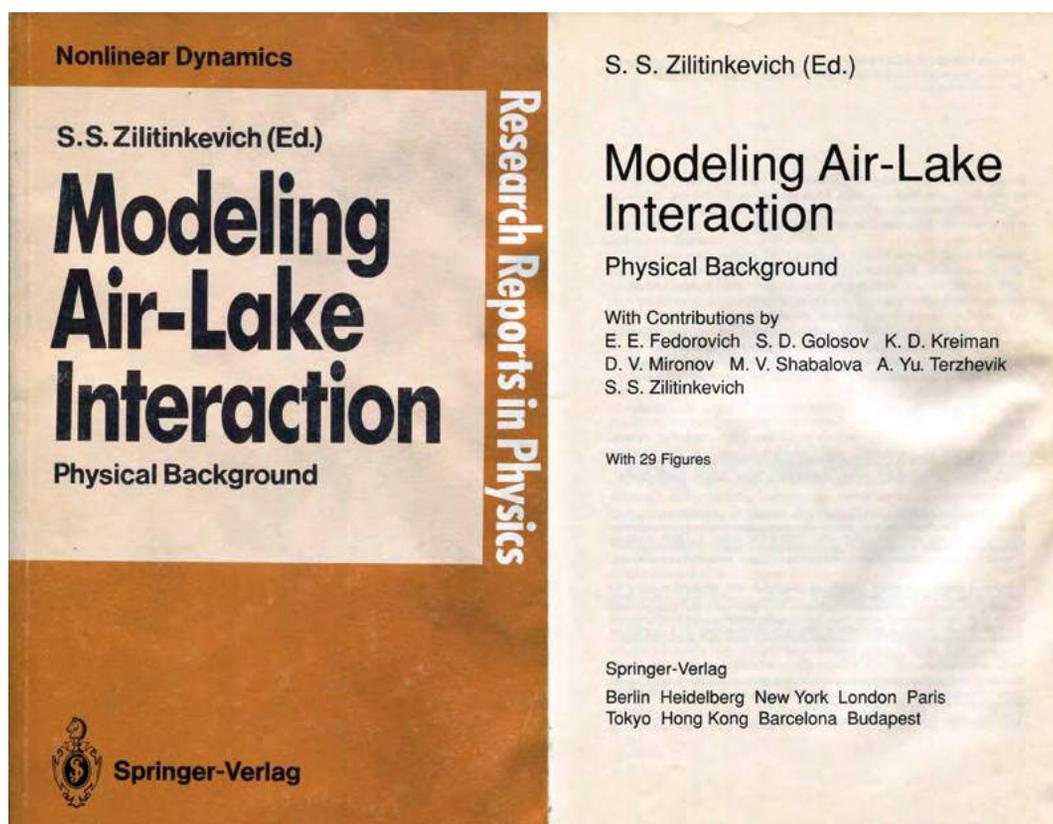


Рис. 12.3. Монография, опубликованная сотрудниками ИНОЗ РАН в издательстве Springer-Verlag

Развитием модели TEMIX стала одномерная нестационарная модель озерной экосистемы [Goloso, Kirillin, 2000]. Основной задачей, для решения которой создавалась модель, была оценка отклика водоема на изменения внешней и внутренней фосфорной нагрузки. Модель позволяла исследовать как отклик экосистемы озера или его части на естественный приток фосфора с водосбора, так и оценивать последствия аварийных сбросов сточных вод из коллекторов промышленных предприятий. С использованием модели были оценены последствия загрязнения Волховской губы Ладожского озера соединениями фосфора во время аварии на Сясьском ЦБК зимой 1998–1999 гг. Результаты расчетов показали, что поступление аварийного сброса из коллектора ЦБК в водную массу и донные отложения Волховской губы с весенним паводком уже в первые летние месяцы могло бы привести к резкому ухудшению экологической обстановки в южной части Ладоги. В этом случае южная часть озера могла бы превратиться в непригодную для рекреационных целей акваторию. В дальнейшем модель была преобразована в универсальную математическую модель гидротермодинамики озера FLake (Fresh-water Lake) [Mironov, 2008]. В модели реализованы результаты Института, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды [Mironov, 2008].

На основе модели FLake создана моделирующая система FLakeEco [Climate change impact on thermal..., 2012], с использованием которой в рамках научного сотрудничества с Институтом рыбоводства и пресноводной экологии Германии смоделирована многолетняя динамика термического и кислородного режимов двух разнотипных озер – Мюггельзее (полимиктическое) и Хайлигензее (димиктическое), расположенных в черте г. Берлина, и дан прогноз ухудшения экологического со-

стояния этих озер на период до 2100 г. под воздействием возможных изменений регионального климата. В соответствии с результатами расчетов в обоих озерах могут резко измениться термический режим и условия перемешивания, что приведет к резкому ухудшению кислородного режима.

Несмотря на очевидные достоинства одномерных моделей (простота реализации, ясный физический смысл, лежащий в основе уравнений и др.), исследования экологического состояния Ладожского озера требовали разработки более сложной гидротермодинамической модели, которая могла бы воспроизводить термический режим и структуру течений в различных по морфометрическим параметрам районах озера. Первая версия такой модели создана и протестирована в 1988 г. по инициативе и под руководством работавшего в Институте Л.А. Оганесяна – выдающегося специалиста по численному анализу, одного из создателей всемирно признанного метода конечных элементов. Трехмерная нестационарная модель, разработанная на основе полных уравнений гидротермодинамики [Астраханцев, Егорова, Руховец, 1988], описывает такие явления, как образование и таяние льда, динамику термического бара, формирование термоклина весной и его разрушение осенью. На основе этой модели создана трехмерная нестационарная модель экосистемы Ладожского озера [Астраханцев, Меншуткин, Писулин, Руховец, 1992; Моделирование сукцессии фитопланктона..., 1998; Development of models for the lake..., 2000]. Недостатком указанных моделей является то, что в них отсутствует учет непосредственного воздействия атмосферы на озеро. Последнее существенно ограничивает применимость моделей при решении задач о влиянии изменчивости регионального климата на гидротермодинамику озер и их экологическое состояние. Для преодоления возникшей проблемы к озерным условиям была адаптирована математическая модель гидродинамики внутреннего моря (сокр. МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [Ибраев, 2008]. Выбор модели был обусловлен тем, что гидротермодинамические процессы в Ладожском озере отличаются многообразием и сложностью и по этим показателям озеро рассматривается скорее как пресноводное внутреннее море, чем озеро. Вторым, решающим аргументом послужило то, что данная модель прошла успешную апробацию при моделировании гидротермодинамики Каспийского моря, являющегося характерным представителем класса внутренних морей.

В конце 1990-х годов в Институте озерадения РАН выполнялись исследования миграции растворенных тяжелых металлов (ТМ) в озерно-речной сети на примере водосбора водохранилища Лахтинский Разлив (г. Санкт-Петербург) [Водные объекты в условиях техногенеза..., 1998]. Разработана математическая модель, описывающая массообмен между водой и донными отложениями, процессы сорбции и десорбции ТМ наносами, а также комплексообразованию между растворенным органическим веществом и тяжелыми металлами. Даже без учета консервативности примеси модель требовала задания более 40 параметров. Разработка послужила хорошей основой для выполнения имитационных расчетов, направленных на углубление понимания механизмов формирования загрязнения водных объектов. Однако в полной мере обеспечить модель значениями входных параметров, основанных на данных натуральных наблюдений, так и не удалось. Приведенный пример иллюстрирует характерную ситуацию с моделированием качества воды, когда есть понимание происходящих процессов и можно их описать математически, но с обоснованным заданием значений многочисленных параметров возникают серьезные затруднения. В результате модель остается чисто исследовательской.

В начале 2000-х годов в ИНОЗ РАН разработана модель фосфорного баланса Ладожского озера, Невской губы и их водосбора [Кондратьев, 2007]. В качестве основных блоков модели выделены следующие пространственные элементы: озера Сайма, Онежское, Ильмень и их водосборы, Ладожское озеро с частным водосбором (включая рр. Волхов, Вуокса, Свирь и др.), Невскую губу и частный водосбор р. Невы (включая территорию Санкт-Петербурга). Потоки фосфора рассчитывались с шагом по времени 1 год. В пределах каждого выделенного пространственного элемента (частного водосбора) рассчитывались следующие элементы баланса общего фосфора ($P_{\text{общ}}$): нагрузка, сформированная на водосборе точечными и рассредоточенными источниками естественного и антропогенного происхождения, приток $P_{\text{общ}}$ из других водоемов, фосфороудерживающая способность как водоема, так и водных объектов водосбора, вынос $P_{\text{общ}}$ из донных отложений, вынос $P_{\text{общ}}$ из водоема и его поступление в последующие блоки модели. Одним из результатов использования указанной модели явился фосфорный баланс Ладожского озера с оценкой вклада различных источников фосфорной нагрузки, представленный на рис. 12.4.

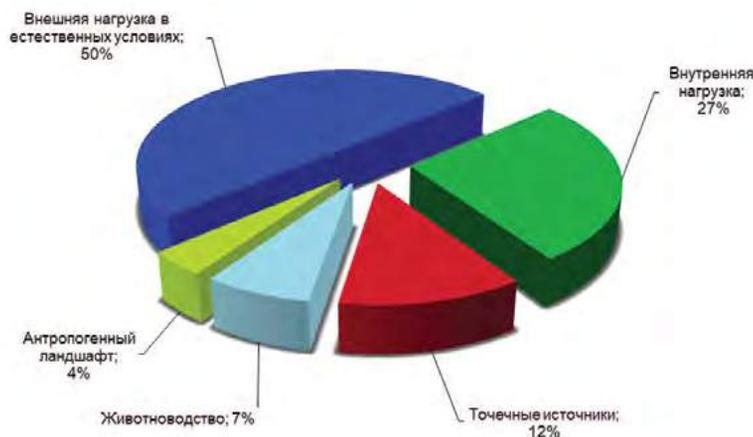


Рис. 12.4. Долевой вклад различных источников в формирование фосфорной нагрузки на Ладожское оз. [Кондратьев, 2007]

Особое внимание в исследованиях ИНОЗ РАН уделялось оценке состояния Невской губы, которая после строительства Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) фактически стала пресноводным водоемом, находящимся в черте города. Качество воды Невской губы определяется, главным образом, поступлением химических веществ со стоком Невы и сбросами городских очистных сооружений. В 1989–1991 гг. научный коллектив сотрудников ИНОЗ под руководством к.т.н. С.В. Грибина выполнил уникальные комплексные исследования по изучению и моделированию распространения шлейфов сточных вод Северной станции аэрации (ССА) сточных вод в Невской губе [Разработка рекомендаций по рациональному..., 1991; Gribin, Assaul, Andreev, Kondratyev, 1994]. Работа включала как экспериментальные исследования на северной части акватории Невской губы, так и лабораторное и математическое моделирование. Целью исследований являлось экспериментальное и модельное изучение шлейфа сточных вод от выпусков ССА Санкт-Петербурга в Невской губе. В ходе выполнения математического моделирования показано, что водо-выпуск ССА работает в режиме эжекторного насоса, который засасывает в себя и пропускает через створ шириной 200–250 м значительные объемы ($140 \text{ м}^3/\text{с}$) воды с акватории Невской губы. Это, в свою очередь, приводит к понижению водообмена вдоль побережья, образованию водоворотных структур и застойных зон как выше, так и ниже по течению. Из сказанного следует, что обвинения в адрес КЗС по поводу образования застойных зон в Невской губе не всегда соответствуют действительности.

Более общую картину распространения шлейфов сточных вод в Невской губе иллюстрируют результаты моделирования, выполненного совместно с Санкт-Петербургским Филиалом Института океанологии РАН с использованием трехмерной гидродинамической модели [Оценка изменения качества воды..., 2006]. По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

- Наиболее загрязненным является район у устья Невы между о. Белый и северной дамбой морского канала. Превышение прибрежных концентраций общего фосфора над фоновыми значениями здесь будет иметь место при любом ветре за исключением южного, который способствует очищению южной части рассматриваемого района у северной дамбы морского канала. Дамба является препятствием, ограничивающим проникновение шлейфов сточных вод ЦСА к южному побережью Финского залива.

- У южного побережья Невской губы наихудшая ситуация отмечается летом при западном ветре, который приводит к возникновению пятна повышенной концентрации в юго-восточной части губы. Этот район акватории оказывается практически свободным от загрязнения сточными водами, за исключением нагонных ситуаций.

- Мелководная акватория у северного побережья Невской губы подвержена загрязнениям сбросов ССА. Здесь неблагоприятные ситуации возникают при западном и северном ветрах.

- У северного и восточного побережий о. Котлин зоны повышенной концентрации $P_{\text{общ}}$ наблюдаются летом при восточном и южном ветрах, а также в зимнее время. Южное побережье острова загрязнено несколько меньше.

• Манипулирование затворами водопропускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в окрестности дамбы. При этом качество воды может быть улучшено уменьшением концентрации вредных примесей у северных побережий Невской губы и о. Котлин. Добиться значительного улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, таким образом, по-видимому, не удастся.

С помощью методов математического моделирования выполнено исследование формирования аварийных (ливневых) сбросов части неочищенных сточных вод основными очистными сооружениями города при выпадении интенсивных осадков, а также дана оценка траекторий их последующего движения по акватории Невской губы [Формирование ливневых сбросов..., 2006]. Полученные результаты показали, что ливневые сбросы способны сформировать существенное повышение содержания примесей в окрестностях водовыпусков очистных сооружений и явиться причиной возникновения локальных гидроэкологических проблем. Ливневые сбросы сильно увеличивают концентрации примесей в окрестности водовыпусков очистных сооружений и приводят к образованию пятен повышенной концентрации, распространяющихся по акватории Невской губы (рис. 12.5). Характерное время существования повышенных концентраций в окрестности водовыпусков составляет от 10 часов до 1–1,5 суток. Пятна повышенной концентрации,двигающиеся по акватории губы под воздействием гидрометеорологических факторов, могут существовать значительно дольше (до нескольких суток).

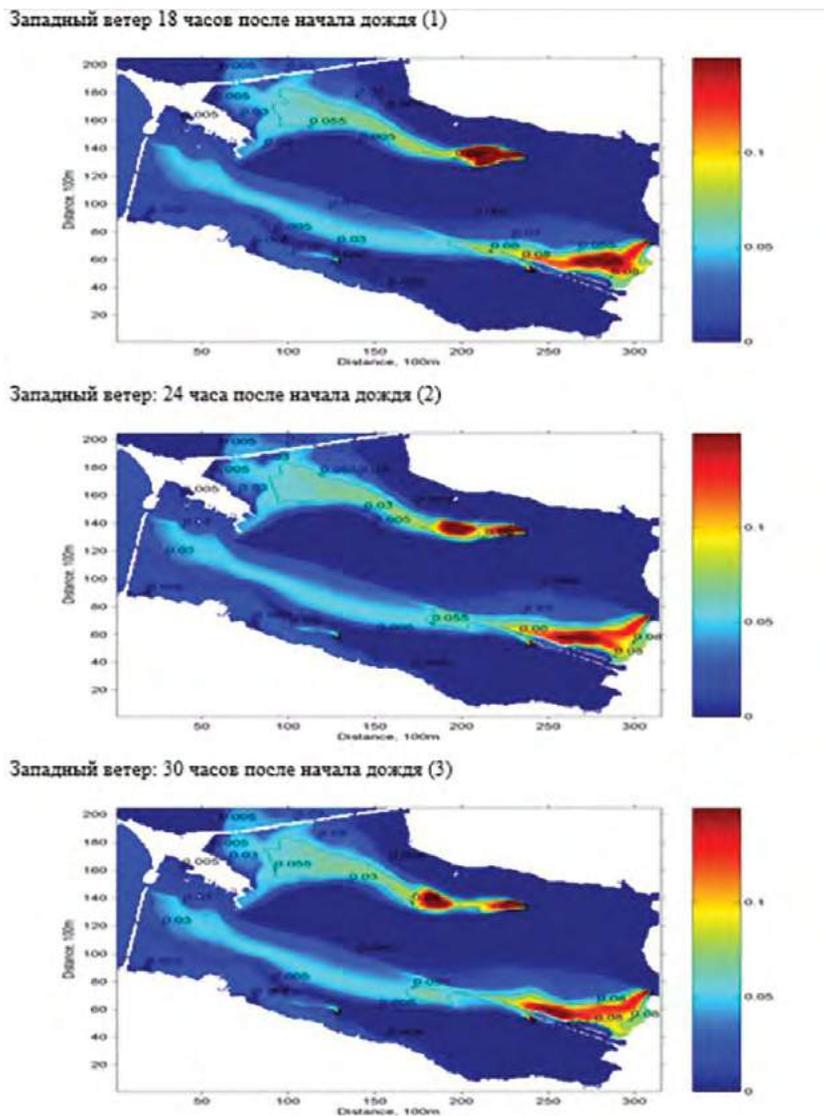


Рис. 12.5. Распределение поверхностной концентрации $P_{\text{общ}}$ (мг/л) в Невской губе через 18(1), 24 (2) и 30 (3) часов после начала выпадения осадков. Летний стоково-ветровой режим при расходе Невы $2540 \text{ м}^3/\text{с}$ и западном ветре $3,5 \text{ м/с}$

Методы трехмерного гидродинамического моделирования использовались при оценке перспективной оптимизации расположения водовыпусков муниципальных очистных сооружений ГУП «Водоканал СПб» на акватории Невской губы [Исследование влияния местоположения..., 2005; Оптимизация расположения водовыпусков..., 2007]. Критерием оптимального расположения выпусков в Невской губе определены локализация загрязнений в их непосредственной окрестности и скорость последующего разбавления вдали от берегов вне застойных зон. Численные эксперименты по выбору оптимального размещения водовыпусков Юго-западных очистных сооружений (ЮЗОС) позволили определить наилучший вариант их расположения вблизи Морского канала, что и было реализовано на практике. Существующая гидродинамическая ситуация в этой части Невской губы в большинстве случаев приводит к тому, что сточные воды ЮЗОС распространяются в шлейфе стоков Центральной станции аэрации (ЦСА) вдали от берега и подвержены дополнительному перемешиванию в зоне морского канала проходящими судами.

С конца 1980-х гг. в Институте озераведения РАН получило развитие математическое моделирование процессов формирования стока, выноса с водосбора биогенных веществ, формирования внешней нагрузки на водные объекты [Румянцев, Кондратьев, Капотова, Ливанова, 1985; Кондратьев, 2007]. В большинстве случаев создание такого рода моделей завершалось их практическим внедрением и подготовкой соответствующих рекомендаций по использованию [Рекомендации по использованию радиолокационной..., 1987; Гаврилица, Папук, Кондратьев, 1990]. Разработанные модели, получившие название ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) и ILLM (Institute of Limnology Load Model), прошли верификацию на ряде водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, Шуя, Водла и др. [Кондратьев, Шмакова, 2019; Кондратьев, Максимов, Шмакова, Уличев, 2014]. В материалах Хельсинской комиссии [Applied methodology for the PLC-6 assessment, 2019] представлено описание моделей, которые могут, используются для расчета внешней нагрузки на водные объекты, в их число вошла и модель ILLM. По результатам выполнения проекта Европейского Союза BaltHazAR II [2012] сделан вывод о том, что «... модель ILLM может использоваться для расчета биогенной нагрузки на Балтийское море для неконтролируемых и частично контролируемых водосборов в Российской части водосборного бассейна». В выводах российско-шведского проекта RusNIP II [An improved system..., 2015] говорится о том, что «модель ILLM наиболее удобна для использования в относительно крупных водосборах».

С начала 2000-х гг. в Институте интенсивно развивается направление математического моделирования транспорта наносов речными потоками, переноса взвешенных частиц в акватории озер и водохранилищ, их заиления и размыва [Шмакова; 2011; 2013; 2018]. Одной из основных проблем, ограничивающих возможности использования моделей стока, выноса биогенных элементов и взвешенных частиц, снижающих достоверность расчетов, является недостаток данных натурных наблюдений. Решение найдено в виде стохастического генератора метеоэлементов SWM (Stochastic Weather Model), обеспечивающего детерминированные модели продолжительными рядами метеорологических показателей. [Шмакова, 2000]. Значительное внимание специалистов в области математического моделирования уделяется разработке и совершенствованию гидродинамического подхода к описанию течения и переноса примеси в речных руслах. Основным объектом изучения являлась р. Нева, связывающая Ладожское озеро и Невскую губу Финского залива. В практике Института использовались следующие математические модели, позволяющие решать разнообразные задачи, связанные с течениями и переносом примесей в р. Неве:

- Одномерная модель (уравнения Сен-Венана), описывающая неустановившееся течение и перенос примеси в русле при условии осреднения характеристик потока по площади живого сечения [Котрехов, 2000], при этом возможно выполнение расчетов в разветвленной речной системе с учетом воздействия нагонных явлений.
- Двухмерная и трехмерная модели, описывающая неустановившееся течение в русле реки, перенос растворимой примеси и взвешенных частиц и предназначенные для детального описания распространения загрязненных вод в русловом потоке, в том числе в окрестностях водозаборов [Кондратьев, Шмакова, 2019].

Перспективным направлением исследований в области изучения и моделирования водных объектов является создание расчетных методов, ориентированных на использование данных дистан-

ционного зондирования акватории подстилающей поверхности. Примером может служить метод приближенной оценки биогенной нагрузки на озера и их трофического статуса по данным о структуре водосбора, полученным с помощью аэрофотосъемки [Кондратьев, 1987]. Достоинством таких моделей являются оперативность получения информации и возможность описания пространственной неоднородности характеристик подстилающей поверхности и акваторий. В 2015 г. данные космической съемки поверхности водосборов Финского залива и Онежского озера успешно использовались при моделировании биогенной нагрузки на указанные водоемы в рамках проектов ИНОЗ РАН «Научно обоснованные предложения по установлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)» и «Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно обоснованных предложений по её снижению», выполненных в рамках Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». В настоящее время модели Flake и FLakeEco, совместно с данными космической съемки, используются для дистанционной оценки характеристик труднодоступных неизученных озер северных территорий. Результаты анализа космической информации используются для верификации 3D- гидротермодинамических и экосистемных моделей крупных водоемов.

Научные интересы сотрудников Института не ограничивались проблематикой, связанной лишь с изучением озёр и их водосборов. В 2013 г. сотрудник ИНОЗ РАН С.В. Грибин подготовил и опубликовал фундаментальную монографию «Формальная физика: уравнения движения» (рис. 12.6), в которой автор постарался объективно оценить корректность соответствующих уравнений математической физики и степень их полноты, изложил разработанную им теорию, позволяющую по-новому взглянуть на уравнения, описывающие явления микро- и макромира [Грибин, 2013]. В основу работы С.В. Грибина была положена аксиоматика теории сплошной среды. В механике сплошных сред рассматриваются движения материальных точек. Такой подход позволяет использовать аксиому сплошности, т.е. считать, что материальное тело представляет собой сплошную среду, заполняющую объём без свободных промежутков; свойства тела во всех его точках одинаковы и не зависят от размеров тела. Соответственно, такие характеристики тел, как плотности, скорости, объёмы, и т.д., считаются непрерывными. Монография С.В. Грибина является фундаментальным трудом по теоретической физике, в которой он применил математические аппараты специальной теории относительности, квантовой теории и электродинамики к процессам в сплошных средах. Чтобы оценить весь масштаб работы автора, необходимо внимательно прочитать саму монографию.

Автор работал над второй частью своей монографии, где предполагал рассмотреть иные формы векторных произведений комплексных 4-мерных векторов. Предметом рассмотрения должны были стать вопросы по преобразованию метрического тензора Римана. Также предполагалось рассмотреть известные преобразования Галилея, которые приводят к классическим уравнениям движения сплошной среды в случае исполь-

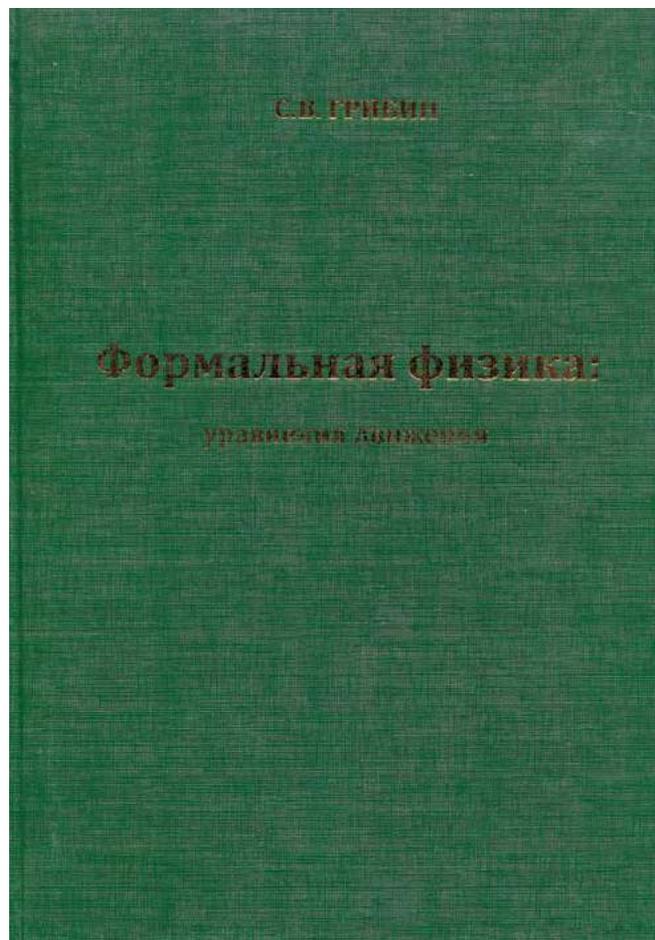


Рис. 12.6. Монография С.В. Грибина «Формальная физика: уравнения движения»

зования вещественных уравнений. Комплексные уравнения движения, как было показано, позволяют вывести соотношение между градиентом скалярной части волновой функции и её векторной частью, что достаточно для получения различной формы уравнения Шредингера в различных полях. Автор видел и многие другие возможности развития своей теории. К сожалению, С.В. Грибин не успел реализовать эти планы и продолжить работу над своей теорией.

Детерминированно-стохастическая модельная система ИНОЗ РАН. В результате многолетних исследований в области моделирования сформирована и успешно используется детерминированно-стохастическая модельная система ИНОЗ РАН, ориентированная на количественную оценку процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем», а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натуральных наблюдений. Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. На сегодняшний день в состав модельной системы входят следующие компоненты [Кондратьев, Шмакова, Голосов, Зверев, 2021]:

- Модель формирования стока на водосборе ИЛНМ [Кондратьев, 2007; Кондратьев, Шмакова, 2016; 2019].
- Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект – ИЛЛМ [Nutrients and heavy metals..., 2005; Кондратьев, Казмина, Шмакова, 2011; Кондратьев, Шмакова, 2019].
- Математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D) [Шмакова, 2013; Кондратьев, Шмакова, 2019].
- 1D-модель теплового режима и перемешивания водоёма FLake [Golosov, Tolmachev, Kirillin, Shipunova, 2006; Some features of the vertical..., 2007; FLake-Global: Online..., 2011].
- 1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме FLakeEco [Some features of the vertical..., 2007].
- 2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме [Шмакова, Кондратьев, Маркова, 2016; Шмакова, Кондратьев, 2017; Кондратьев, Шмакова, 2018; 2019].
- 3D-модель тепло- и массопереноса в водоеме МГВМ, адаптированная к озерным условиям [Ибраев, 2008; Оценка влияния основных притоков..., 2017; Информационно-моделирующий комплекс..., 2020].
- Стохастическая модель погоды SWM [Шмакова, Кондратьев, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2019].

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной модельной системы при решении задач, связанных с количественной оценкой и прогнозом тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем».

Оценка твердого стока с водосбора Ладожского озера. В настоящее время в ИНОЗ РАН создана общая методология оценки твердого стока водных объектов [Шмакова, 2018; Shmakova, 2022], основу которой составляет модель движения воды и твердого вещества в речном потоке. Эта модель основана на уравнениях, описывающих силы, действующие в системе «водный поток – донные отложения – наносы». Для всех показателей транспорта наносов в речном потоке (общего расхода наносов, расхода влекомых и взвешенных наносов, транспортирующей способности потока) получены расчетные формулы, которые апробированы на большом количестве водотоков с различными гидравлическими и морфометрическими характеристиками.

Взвешенные наносы, поступающие в Ладожское оз. со стоком притоков, являются сорбентами различных загрязняющих веществ и приводят к заилению южной мелководной акватории. Тем не менее, наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского оз. в рамках государственного мониторинга практически не проводились. Исключение составляют эпизодические непродолжительные измерения на гидрометрических створах на реках Олонка – г. Олонец (1953 и 1956 гг.) и Свирь – с. Мятусово (1945 и 1948 гг.). Расчеты твердого стока и мутности воды притоков озера проводились по разработанной в ИНОЗ РАН стохастической модели годового твердого стока [Шмакова, 2018]. Модель основана на аналитической формуле расхода наносов и композицион-

ном методе теории вероятности, что позволяет оценить параметры распределения функции через параметры распределения аргументов. Аргументами модели являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов. Оценка стока наносов основных притоков Ладожского озера состоит из следующих этапов расчета:

1. Выбор рек-аналогов для основных притоков Ладоги, по схожим гидравлическим характеристикам гидрометрических створов водотоков Северо-Запада.
2. Калибровка параметров расчетной формулы общего расхода наносов для рек-аналогов для различных периодов водности.
3. Аппроксимация функциональной зависимости поля точек связи «расход-уровень» для притоков.
4. Оценка параметров распределения суточных значений расхода воды притоков.
5. Оценка параметров распределения годового стока наносов и мутности воды основных притоков.

Схема расположения основных притоков Ладоги, для которых рассчитывались сток наносов и мутность воды, приведена на рис. 12.7.

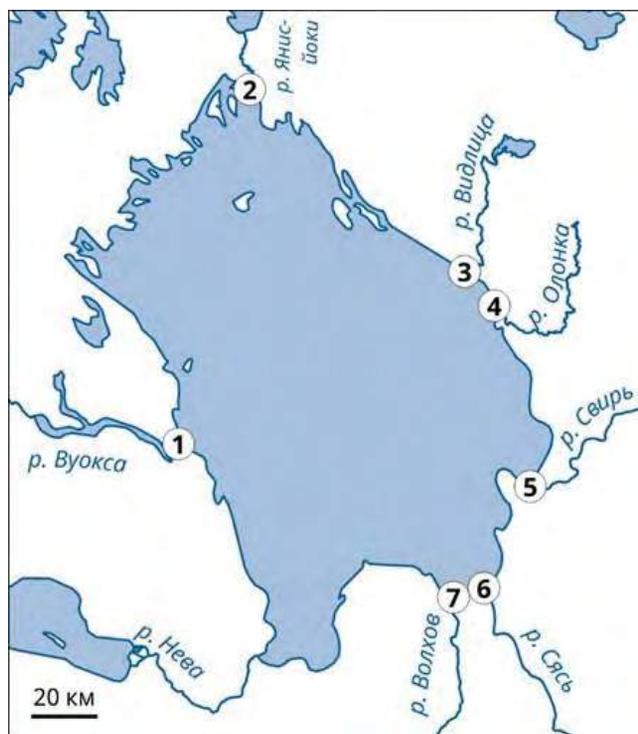


Рис. 12.7. Расположение основных притоков Ладожского оз., для которых рассчитывался сток наносов

Согласно результатам вычислений с основными притоками, на которые приходится 88 % водосборной площади озера, в Ладогу поступает около 380 тыс. тонн речных наносов в год. На основе этого можно оценить количество речных наносов со всего водосбора в 432 тыс. т/год. Средний по водосбору годовой модуль стока наносов равен 1,53 т/(км²Ч) Согласно результатам вычислений с основными притоками, на которые приходится 88 % водосборной площади озера, в Ладогу поступает около 380 тыс. тонн речных наносов в год. На основе этого можно оценить количество речных наносов со всего водосбора в 432 тыс. т/год. Средний по водосбору годовой модуль стока наносов равен 1,53 т/(км² год). Основной вклад в поступление наносов в акваторию Ладожского оз. осуществляют водотоки с наибольшей водностью – Свирь, Вуокса и Волхов, на долю которых приходится 253 тыс. т/год или 59 % от общего количества наносов. Однако, на эти же водотоки приходится наименьший годовой модуль стока наносов, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов.

Перспективы развития методов расчета твердого стока состоят в интеграции моделей интенсивности почвенной эрозии на водосборе и двухфазного массопереноса в речном потоке. Актуальность такой интеграции связана с тем, что почвенная эрозия является одним из основных поставщиков твердого материала в русло реки. Комплекс моделей двухфазного массопереноса в системе «водосбор-водоем» позволяет оценить перераспределение твердого вещества на разных этапах транспорта твердого вещества и дать оценку интенсивности этого процесса в соответствии с принятым климатическим прогнозом или возможным планированием хозяйственной деятельности на водосборе и русле реки. Также актуально развитие методов решения геоэкологических задач, связанных с вопросами вторичного загрязнения водных объектов донными отложениями через инициацию процессов взмучивания и транспорта донных отложений.

Трехмерное моделирование Ладожского и Онежского озер. В рамках тем НИР Госзадания ИНОЗ РАН FMNG-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под влиянием природных и антропогенных факторов» и проекта РФФ 14-17-00740 «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» выполнены исследования термогидродинамики Ладожского и Онежского озер с использованием трехмерной модели МГВМ, адаптированной к использованию в озерных условиях [Голосов, Зверев, Шипунова, 2020]. Верификация модели выполнялась по данным натурных наблюдений за распространением вод основных притоков по акватории озера и их влиянию на формирование пространственного распределения минерализации озерных вод (рис. 12.8) [Оценка влияния основных притоков..., 2017; Голосов, Зверев, Шипунова, 2020]. Как показали численные эксперименты, модель достаточно хорошо описывает главные особенности термогидродинамических процессов в озере, прежде всего – циркуляцию вод в озере, положение и скорость продвижения фронта термобара.

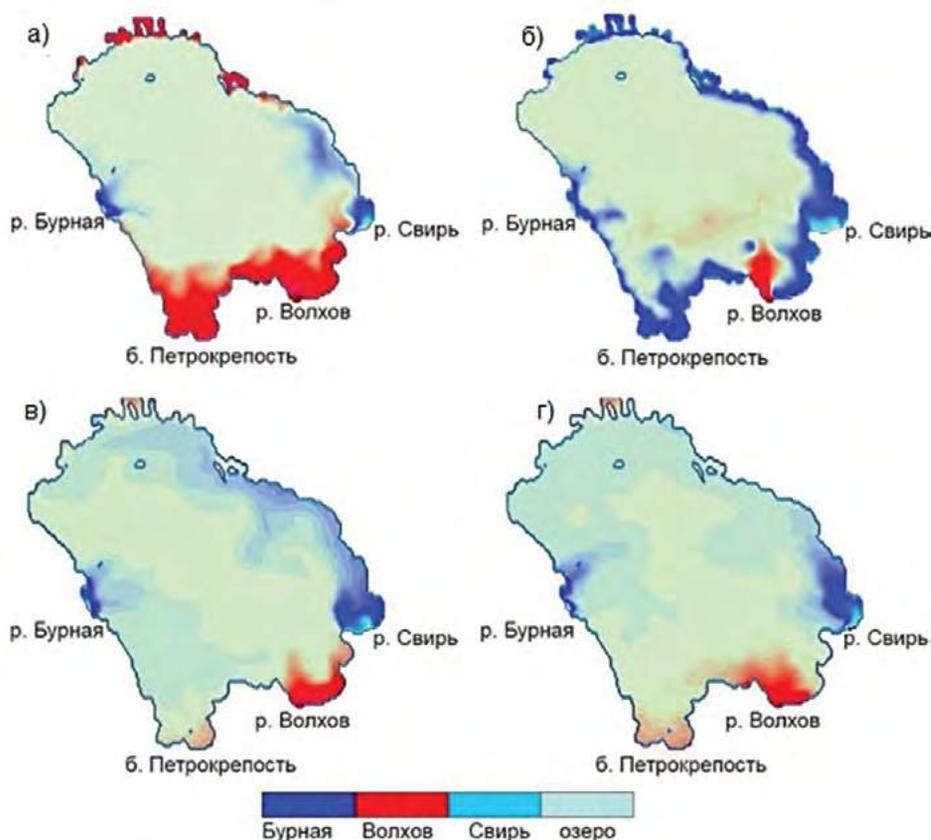


Рис. 12.8. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского оз. в различные сезоны «среднеклиматического» года по результатам моделирования: а), б), в), г) – в зимний период, в конце ледостава, в летний и осенне-зимний периоды соответственно

С использованием 3D- модели МГВМ исследованы термический и ледовый режимы Ладожского и Онежского озер в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий (нормы для 1960–1990 гг.) для широты Ладоги, а также и при «возможных климатических изменениях на водосборе» в соответствии с климатическим сценарием МРІ В2. Численные эксперименты показали, что основное отличие при потеплении от среднеклиматического сценария начинается в первых числах ноября в южных районах озера и сказывается на скорости нарастания и таяния льда. При потеплении озеро способно полностью покрыться льдом, однако его малая толщина предопределяет ранние сроки таяния. Следует ожидать, что полное очищение озера ото льда, возможно, будет происходить на 2–3 недели раньше по сравнению со среднеклиматическим атмосферным воздействием. Раннее исчезновение ледяного покрова приведет к временному сдвигу в процессах, определяющих термический режим озера в весенне-летний период. Так, образование термобара начнется раньше на 2–3 недели, скорость его распространения по акватории озера будет выше.

Явления апвеллинга/даунвеллинга водных масс играют важную роль в формировании гидротермодинамического и химико-биологического режимов в водоемах, в том числе и в Ладожском озере. Время возникновения и вырождения данных явлений, а также их пространственные параметры могут быть эффективно определены с использованием методов трехмерного математического моделирования. Традиционные температурные зондирования, выполняемые в ходе экспедиционных работ, дают весьма ограниченную информацию, поскольку не имеют возможности одновременно описать полную пространственную картину процесса. Спутниковая информация лишена данного недостатка, однако ее доступность весьма ограничена как техническими, так и метеорологическими условиями. Наиболее эффективным представляется использование методов 3D-моделирования, дополненных как результатами экспедиционных работ, так и методами дистанционного зондирования (рис.12.9).

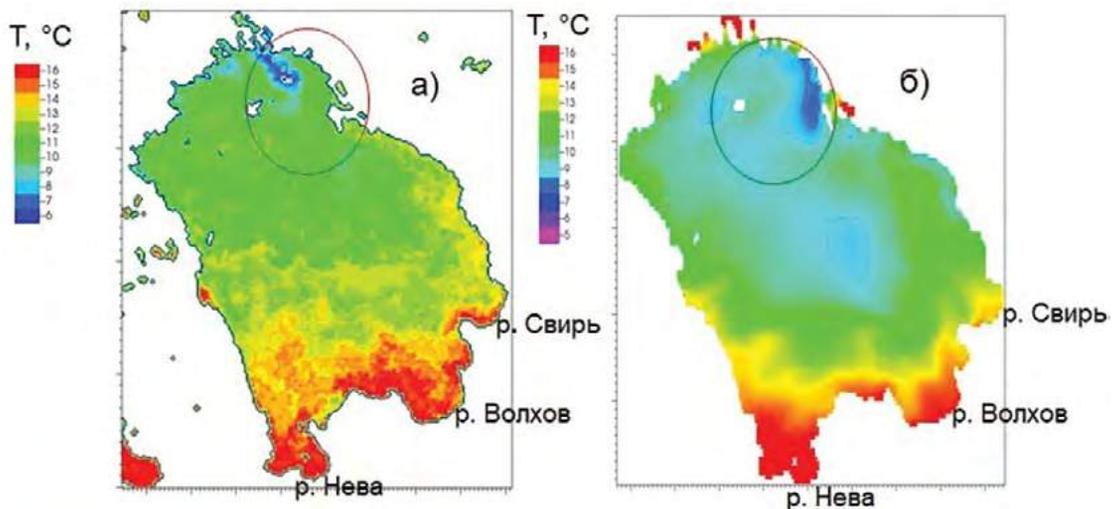


Рис. 12.9. Апвеллинг в северо-восточной части Ладожского озера 29 августа 1997 года (район выделен овальной красной линией): а) – по спутниковым данным; б) – по результатам моделирования

С использованием 3D-моделирования исследовано внутригодовое распределение первичной продукции (ПП) фитопланктона в Ладожском и Онежском озерах для условий среднеклиматического года. Наиболее продуктивными, как и следовало ожидать, являются южные мелководные районы. По результатам моделирования реакции экосистем Ладожского и Онежского озер существенно различаются. В Онежском оз. во все сезоны абсолютные значения ПП ниже по сравнению с Ладожским оз. Это объясняется тем, что температура воды в Онежском озере в периоды открытой воды ниже, чем в Ладожском, что снижает интенсивность продукционных процессов. Кроме того, что фитопланктон Онежского оз. из-за особенностей формирования цветности воды находится в состоянии «радиационного голода». Это означает, что приходящая солнечная радиация поглощается в значительной степени частицами абиогенного происхождения в слое, равном одной

прозрачности. Таким образом, солнечная радиация выступает в роли лимитирующего фактора. Различные ледовые условия также определяет несходство реакции экосистем озер на возможные климатические изменения.

Моделирование Чудско-Псковской озерной системы. Как следует из результатов 3D- моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 12.10а). В подледный период течения в обоих озерах системы в основном носят бароклинный характер, обусловленный неравномерным распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики – в основном, до 1,5–2 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле–мае основным влияющим на течения фактором становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами – циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис.12.10б).

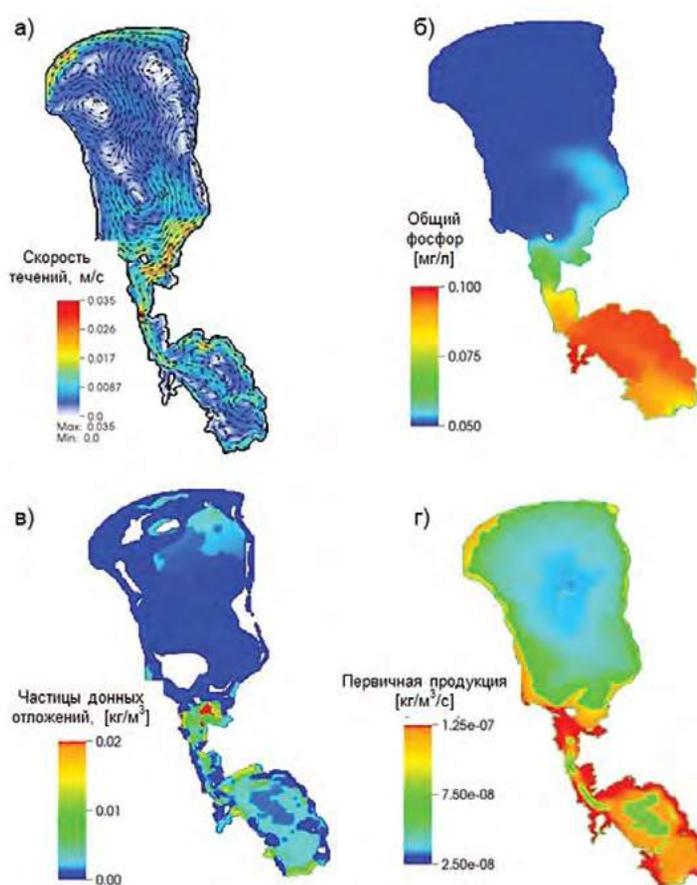


Рис. 12.10. Результаты 3D- моделирования: а – поле скоростей течений в середине апреля; б – пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля; в – пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля; г – пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 12.10в). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. Процессы первичного продуцирования в Чудско-Псковском озере так же, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток фотосинтетически активной радиации на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает

активно развиваться фитопланктон. В летние месяцы свой вклад в интенсификацию ПП вносит прогрев водных масс обоих озер. Фотосинтез водорослей возрастает практически на порядок величины, по сравнению с весенним периодом (рис. 12.10г).

Результаты расчетов внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковское озеро свидетельствуют о том, что гидродинамические процессы являются важнейшим фактором формирования внутренней биогенной нагрузки. Биогенная нагрузка минимальна в зимний период, когда гидродинамические процессы протекают подо льдом с минимальной интенсивностью, в период открытой воды, когда ветровое и волновое воздействие на поверхность донных отложений резко возрастает, внутренняя биогенная нагрузка принимает свои максимальные значения. Для оценки влияния изменений внешней нагрузки на экологическое состояние озера выполнены численные эксперименты по возможному снижению содержания биогенных элементов в стоке основного притока озера р. Великой. Как следует из результатов расчетов, снижение концентрации общих форм фосфора и азота в стоке р. Великой на 10 % по сравнению с современными значениями способно привести к снижению суммарной (внутренней + внешней) нагрузки на Чудско-Псковское озеро на 1,5 % для фосфорной нагрузки и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднесуточным значениям. Тем не менее, снижение внешней биогенной нагрузки является безальтернативным способом улучшения экологического состояния озера, однако быстрого деэвтрофирования ожидать не стоит, поскольку восстановление соответствия трофического уровня донных отложений трофическому уровню водной массы происходит со значительным временным запаздыванием.

В рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» выполнены исследования по оценке биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с использованием методов моделирования. Задействована система моделей SWM + ILHM + ILLM. Итогом моделирования в данном случае является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков, среднемесячных слоев стока и среднегодового выноса биогенных веществ с Российской части водосбора Чудско-Псковского озера в условиях современного климата. Выполнен расчет по оценке перспектив снижения фосфорной нагрузки за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство на исследуемой территории. Нагрузка, сформированная на полях сельскохозяйственных предприятий, оценивалась по методу, предложенному специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [Брюханов, 2016]. Результатом расчета явилась прогностическая оценка снижения фосфорной нагрузки на 10,7 т/год за счет внедрения НДТ.

Работы в рамках проекта «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 30.08.2017 N 9) были направлены на разработку и реализацию мероприятий, одной из целей которых является сохранение и улучшение качества воды и гидроэкологического состояния водохранилищ Волжско-Камского каскада. В рамках выполнения проекта ИНОЗ РАН выполнил оценку биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище, сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора в современных условиях [Оценка биогенной нагрузки..., 2019]. Рассчитанные с использованием модели ILHM + ILLM значения суммарной нагрузки на водохранилище составили 1637 тР/год и 36531 тN/год для условий средней водности. При этом вклад левобережной части – около 69 % от значения суммарной нагрузки (табл. 12.1 и 12.2).

Табл. 12.1. Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с правобережной части водосбора (площадь – 30878 км², средний слой стока 74 мм/год)

	Фосфор	Азот
Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	515,3	11141,4
Природная (фоновая) составляющая	29,4	685,0
Диффузная (антропогенная) составляющая, вкл. атмосферные выпадения	484,4	10427,4
Модуль выноса (кг/км ² год)	16,7	360,8

Табл. 12.2. Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с левобережной части водосбора (площадь – 60207 км², средний слой стока 125 мм/год)

	Фосфор	Азот
Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	1121,8	25389,7
Природная (фоновая) составляющая	104,0	2732,9
Диффузная (антропогенная) составляющая, вкл. атмосферные выпадения	984,0	21243,8
Модуль выноса (кг/км ² год)	18,6	421,7

Проведено выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки. Вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора весьма велик (84–94 % от значения суммарной нагрузки). В ходе оценки сельскохозяйственной нагрузки на водосбор показано, что внедрение в сельскохозяйственную практику НДТ не приведет к существенному снижению биогенной нагрузки на водохранилище. Причиной может служить тот факт, что на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями в последние годы ниже среднего выноса азота и фосфора с урожаем.

На рис. 12.11 представлена блок-схема 3D-модели, которая использовалась для расчетов гидрофизических и химико-биологических параметров Куйбышевского водохранилища [Информационно-моделирующий комплекс на основе..., 2020; Информационно-моделирующий комплекс для..., 2020]. Показано, что модель позволяет воспроизводить пространственно-временную неоднородность распределения гидрофизических и химико-биологических параметров в Куйбышевском водохранилище. В частности, результаты расчетов позволили сделать вывод о том, что во время теплого периода на акватории формируются максимальные значения биомассы водорослей в мелководных хорошо прогретых плесах водохранилища. Так как Куйбышевское водохранилище является эвтрофным водоемом, то при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. Особенно это относится к Черемшанскому заливу, который считается наиболее продуктивным районом водохранилища (рис. 12.12).

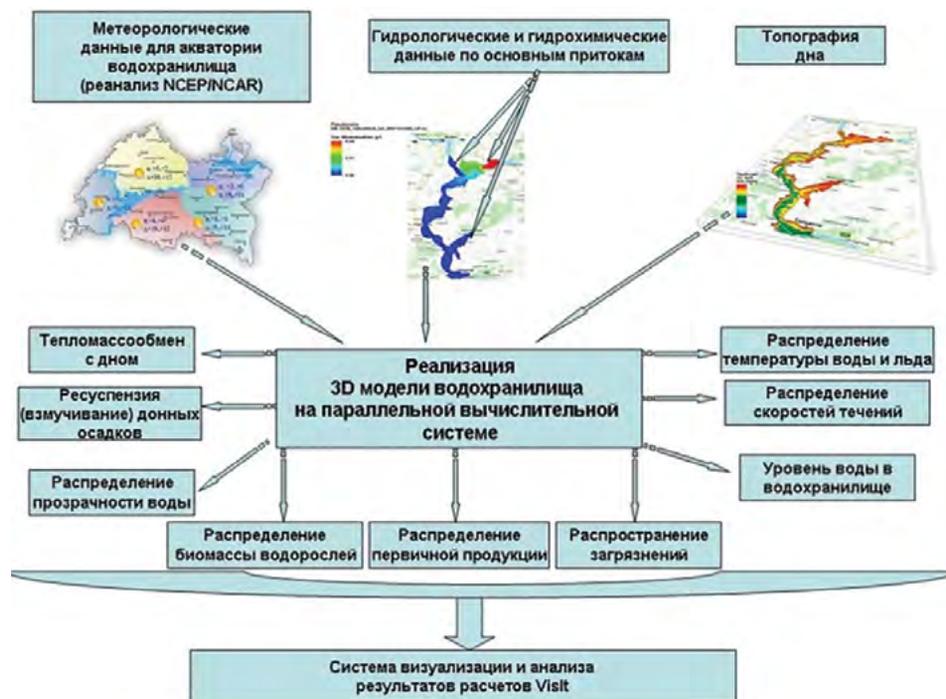


Рис. 12.11. Блок-схема 3D- модели экосистемы Куйбышевского водохранилища

Работы в рамках Российско-Финляндского проекта SEVIRA проводились с целью оценки стока и выноса биогенных элементов с водосборов малых трансграничных рек, формирующих биогенную нагрузку на Балтийское море, а также прогноза возможных изменений гидрологического режима рек и нагрузки на Балтику в результате возможных климатических изменений и антропогенных воздействий. Один из основных объектов исследования – трансграничная река Rakkolanjoki/Селезневка с площадью водосбора 621,2 км² (рис. 12.13а). Результаты расчетов по модели ILM+ILLM (рис. 12.13б) показали, что реализация в трансграничном регионе экологически благополучного сценария выброса в атмосферу парниковых газов RCP2.6 [The representative concentration..., 2011] может привести в 2100 г. к снижению стока с изучаемого водосбора на 4,47 % по отношению к периоду 2006–2016 г. и соответствующему снижению биогенной нагрузки на Выборгский залив Балтийского моря со стороны реки Селезневки на 5,19 % по фосфору и 5,06 % по азоту. Максимальный выброс парниковых газов в соответствии со сценарием RCP8.5 в перспективе вызовет возрастание стока до 24,12 % и выноса фосфора и азота на 28,05 и 26,11 % соответственно. Полученные прогнозные оценки предоставлены администрациям населенных пунктов, расположенных как на финской, так и на российской частях водосбора реки Rakkolanjoki/Селезневки [Кондратьев, Шмакова, 2022а].



Рис. 12.12. Пространственное распределение общей биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в середине лета

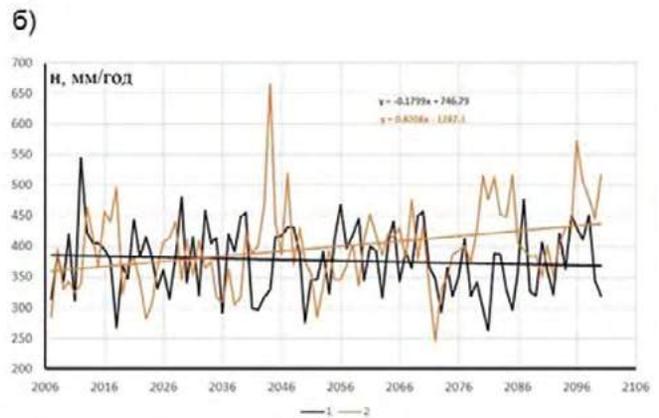
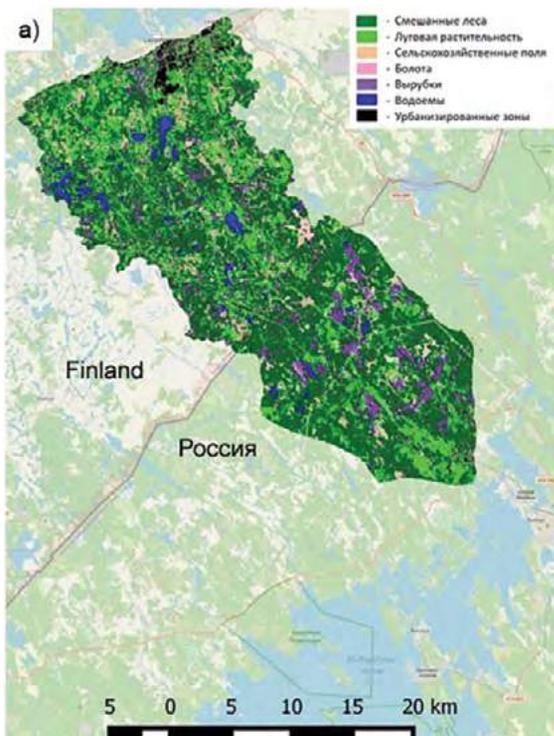


Рис. 12.13. Схема водосбора реки Rakkolanjoki/Селезневка площадью 621,2 км² (а) и результаты расчета стока, мм/год (б) в соответствии со сценариями RCP2.6 (1) и RCP8.5 (2)

Работы в рамках Российско-Финляндского проекта EnviTOX проводились с целью оценки рисков, связанных с возможным попаданием токсичных веществ в водозаборы Санкт-Петербурга, расположенные в р. Неве. Одним из потенциальных источников загрязнения является полигон хранения высокотоксичных отходов I–V классов опасности «Красный Бор», расположенный в 30 км от Петербурга и в 15 км от устья реки Ижоры, через которую возможно поступление аварийного сброса с полигона. Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн тонн токсичных отходов, которые свозились с 1969 г. с территории России и даже из Прибалтики. При возникновении аварийной ситуации на полигоне токсичные стоки могут попасть в реку Ижора, а затем в Неву в 7 км выше водозаборов Санкт-Петербурга (рис. 12.14).

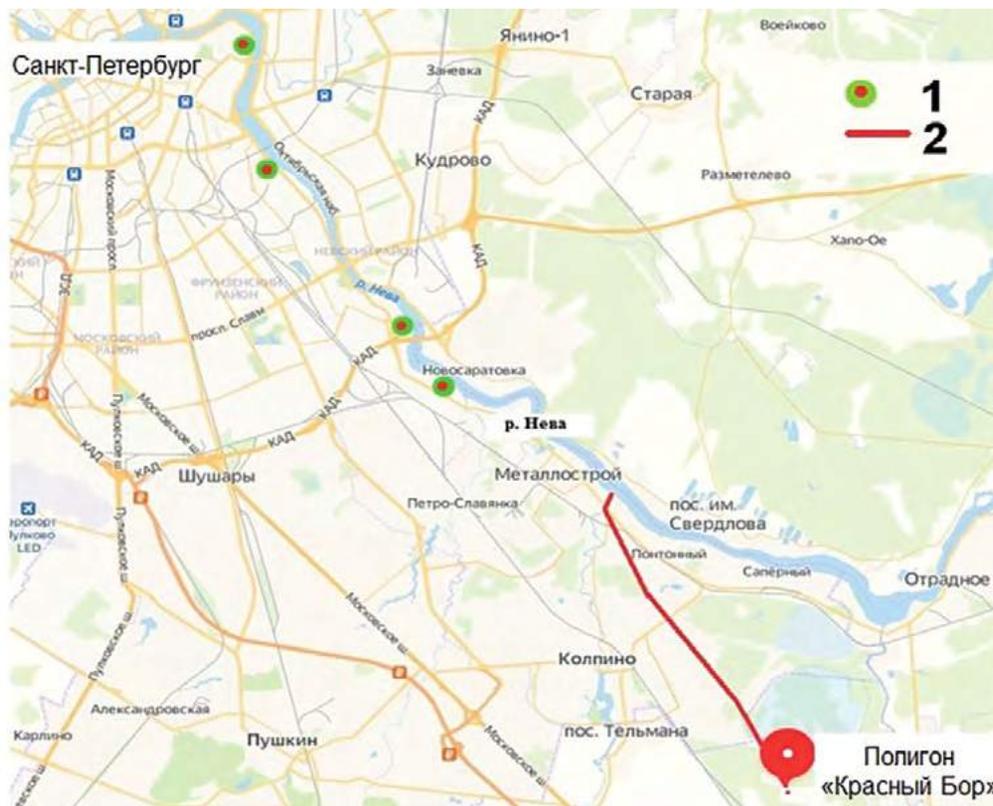


Рис. 12.14. Схема расположения полигона «Красный Бор»: 1 – пункты водозабора Санкт-Петербурга, 2 – маршрут распространения возможного аварийного сброса до русла Невы

Вычисления проводились для трех наиболее вероятных сценариев развития аварийной ситуации на полигоне, которые были определены на основе многолетних натурных исследований на самом полигоне и окружающей его территории:

- Сценарий 1. Перелив содержимого карт-хранилищ токсичных отходов через верхнюю кромку обваловки вследствие интенсивных осадков, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. Превышения уровня содержимого над обваловкой возможно в открытых картах полигона. Объем токсикантов, который может поступить из поверхностного слоя содержимого карт в обводной или внутренней дренажные каналы при теоретически возможном превышении уровня на 0,10 м, составит 794 м³ за 96 часов.

- Сценарий 2. Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие интенсивных осадков в весенний период, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. В данном сценарии предполагается, что разрушение обваловки может быть только в условиях перелива. Глубина разрушения обваловки является параметром расчета. Время действия фактора риска – до 100 часов. Остальные исходные условия соответствуют предыдущему сценарию. Суммарный сброс – 7940 м³ за 100 часов.

• Сценарий 3. Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.) вплоть до полного разрушения обваловки до уровня поверхности почвы на рассматриваемых картах. Остальные исходные условия соответствуют предыдущим сценариям. Суммарный сброс – 176 985 м³ за 100 часов.

На рис. 12.15 приведены результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ, поступивших в гидрографическую сеть водосбора Невы в соответствии с приведенными сценариями аварийного сброса с полигона, для магистрального канала, ручья Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижора и затем до ближайшего городского водозабора Северной водопроводной станции (СВС) на реке Неве при расходах воды разной обеспеченности. В качестве исходной концентрации истечения была принята единичная концентрация вещества. Для русла Невы, кроме распространения растворенной примеси, выполнялся расчет транспорта взвешенных частиц, поступивших со стоком Ижоры и являющихся потенциальным носителем сорбированных на них токсикантов. Характерной особенностью процесса переноса взвешенных и растворенных примесей основным течением Невы является то, что воды притока прижимаются к берегу и распространяются вдоль него при минимальном перемешивании с водными массами основного потока.

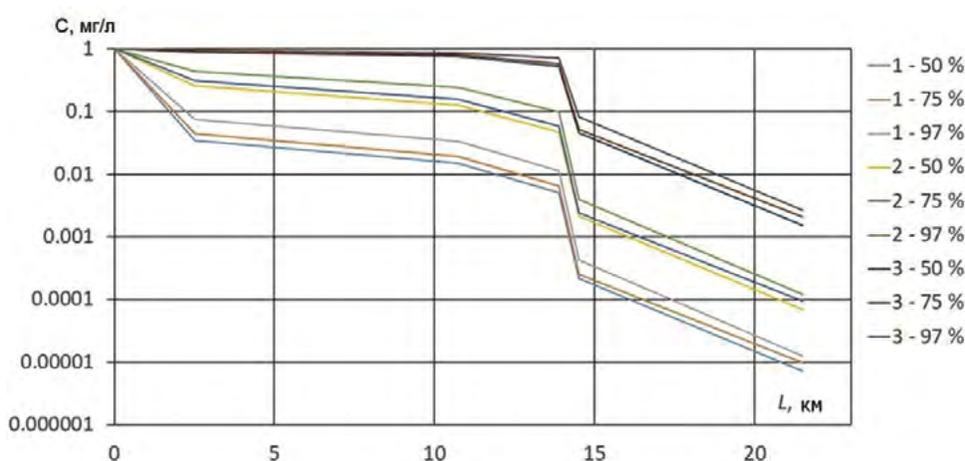


Рис. 12.15. Результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ на участках трассы возможного распространения аварийного сброса по сценариям 1, 2 и 3 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности

Показано, что наиболее неблагоприятная ситуация с разбавлением наблюдается при реализации третьего сценария возможного аварийного сброса с полигона, возникшего в результате полного разрушения обваловки карт-хранилищ токсичных отходов. Снижение водности также негативно сказывается на степени разбавления. Взвешенные частицы, попадающие в русло Невы со стоком Ижоры, не опасны для водозаборов, так как до них не доходят. В условиях средней водности аварийный сброс с полигона достигнет ближайшего городского водозабора примерно через 18 часов. Снижение водности приводит к возрастанию времени добегания. Таким образом, имеется определенный запас времени для принятия необходимых мер по перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети или защите водозабора. Кроме того, чтобы избежать попадания загрязняющих веществ в водозаборы, следует располагать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков. Результаты расчетов кратности разбавления загрязняющих веществ в замыкающих створах участков трассы возможного распространения аварийного сброса на водосборе, а также во вдольбереговой зоне русла Невы при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности [Кондратьев, Шамова, 2022б].

Работы по созданию модели выноса биогенных и загрязняющих веществ с Российского водосбора реки Иртыш проводились в рамках проекта «Научные исследования по изучению динамики содержания химических веществ и изменчивости состояния водных экосистем в бассейне трансграничной реки Иртыш (Ертыс)...» совместно с ООО «ЦИТ», РГГМУ, ИПЭН РАН. Водосборная площадь р. Иртыш и его гидрографических единиц в пределах РФ составляет 657 184 км² (рис. 12.16).

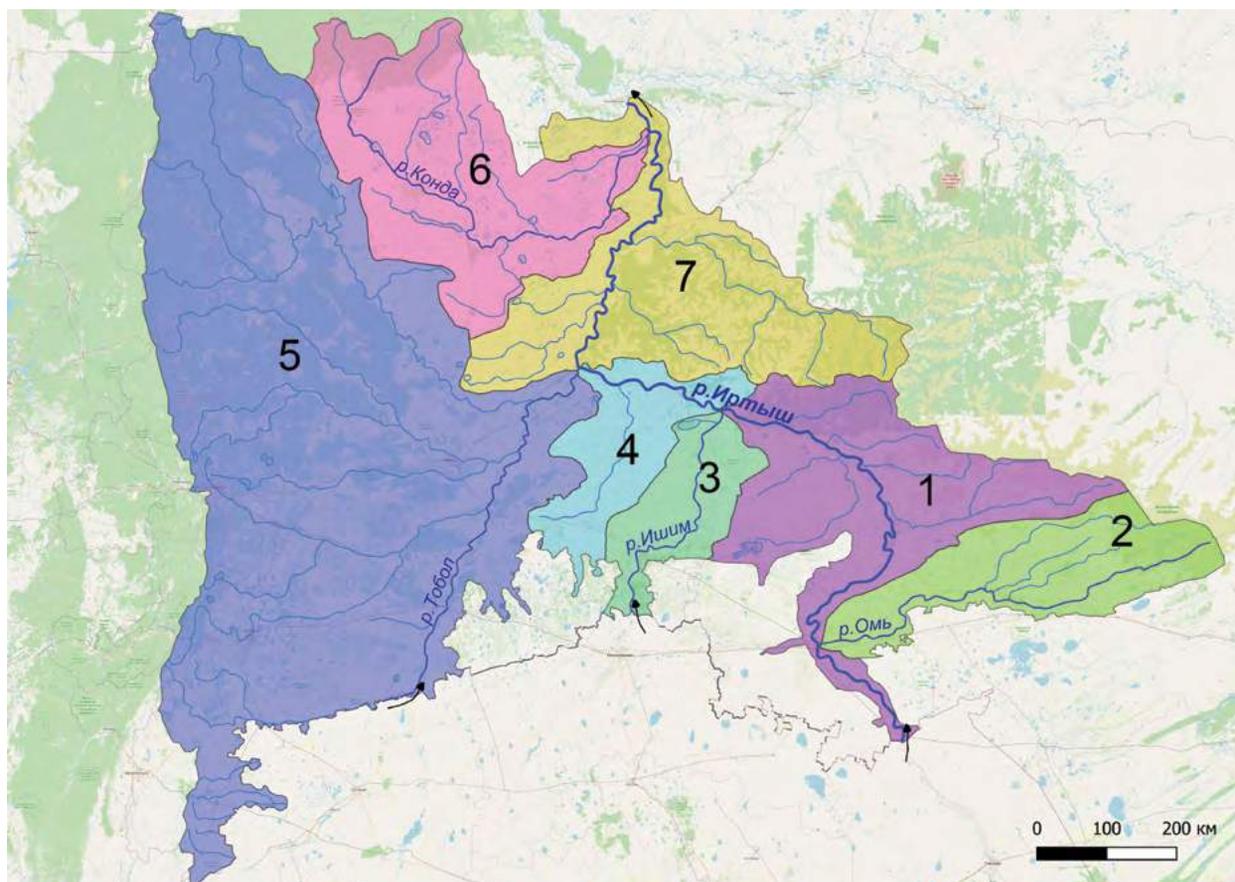


Рис. 12.16. Схема российской части водосбора р.Иртыш и его подбассейнов (гидрографических единиц), в пределах которых формируется нагрузка биогенными и загрязняющими веществами на гидрографическую сеть: 1 – 14.01.02 (водосбор р.Иртыш от границы РФ до впадения р. Ишим), 2 – 14.01.02 (водосбор р.Омь), 3 – 14.01.03 (водосбор р. Ишим), 4 – 14.01.04 (водосбор р.Иртыш от впадения р.Ишим до впадения р. Тобол), 5 – 14.01.05 (водосбор р.Тобол), 6 – 14.01.06 (водосбор р.Конда), 7 – 14.01.07 (водосбор р.Иртыш от впадения р. Ишим до устья)

Анализируя результаты выполненных по модели ILLM расчетов, можно сделать вывод о том, что в целом на российской части водосбора р. Иртыш преобладает диффузная биогенная нагрузка (56,0 % по азоту и 28,8 % по фосфору). По биогенным элементам диффузная нагрузка доминирует на водосборах рек Иртыш в створе с. Усть-Ишим (57,5 % по азоту и 46,6 % по фосфору от суммарного выноса с водосбора), Омь, (84,8 % по азоту и 64,1 % по фосфору), Ишим (66,4 % по азоту) и Тобол (65,1 % по азоту и 44,7 % по фосфору). Вероятной причиной ее доминирования является наличие на этих водосборах информации о результатах сельскохозяйственного производства, а также об атмосферных выпадениях фосфора. Минимальная сельскохозяйственная активность явилась причиной преобладания природной (фоновой) нагрузки на самом северном водотоке р. Конда (95,7 % по азоту и 64,3 % по фосфору от суммарного выноса с водосбора). Водосбор р. Ишим лидирует по точечной фосфорной нагрузке (64,3 %).

По металлам расчеты показывают примерно одинаковый результат – доминирование природной составляющей внешней нагрузки. Причина – отсутствие достаточного объема достоверных данных по антропогенным источникам поступления металлов на водосбор и в его первичную гидрографическую сеть, как точечным, так и диффузным. Исключение составляет водосбор реки Иртыш в створе с. Усть-Ишим, где преобладает трансграничный перенос меди (55,3 %). Безусловно, эти результаты нуждаются в дальнейшем уточнении, возможно на основе проведения специальных полевых исследований.

На рис. 12.17 проиллюстрирована зависимость соотношения вклада диффузной и природной составляющих внешней фосфорной нагрузки на водосбор р. Иртыш в вынос в створе г. Ханты-Мансийск в зависимости от водности. При этом атмосферные выпадения, точечная нагрузка и трансграничный перенос приняты неизменными. Если при высокой водности обеспеченностью

5 % (116,0 мм/год) вклад природной нагрузки доминирует и составляет 33,3% от значения суммарного выноса, то в годы средней 50 % водности (82,9 мм/год) наиболее значимый вклад вносит диффузная нагрузка (28,8 %). Снижение водности до 95 % (59,0 мм/год) приводит к уменьшению вклада как диффузной, так и природной составляющих. Согласно расчетам, в этом случае доминирует точечная фосфорная нагрузка (31,1 % от значения суммарного выноса).

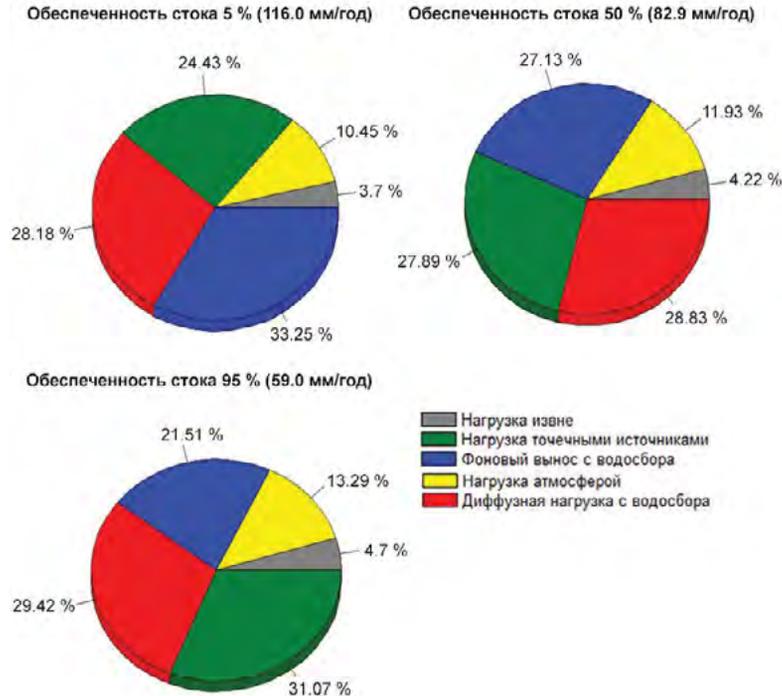


Рис. 12.17. Вклад различных составляющих внешней нагрузки (%) в вынос $P_{\text{общ}}$ р. Иртыш в створе Ханты-Мансийск в годы различной водности

По результатам математического моделирования выполнена оценка возможного снижения биогенной нагрузки и выноса азота и фосфора с российской части водосбора р. Иртыш за счет внедрения НДТ ведения сельскохозяйственного производства. Одной из основных задач внедрения НДТ является переход на современные технологии производства с минимизацией воздействия на окружающую среду при сохранении экономической эффективности сельскохозяйственного производства. Результаты расчетов показывают, что наибольшее снижение сельскохозяйственной биогенной нагрузки на изучаемые территории в результате внедрения НДТ достигается на российской части водосбора р. Тобол (31 % по азоту и 25 % по фосфору от суммарной нагрузки на водосбор). Очевидной причиной указанного факта является максимальная концентрация сельскохозяйственных производств в пределах подбассейна. В целом по российской территории водосбора р. Иртыш внедрение НДТ может снизить нагрузку на 23 % по азоту и 18 % по фосфору.

Количество практических задач, решенных с использованием компонентов модельной системы ИНОЗ РАН, не ограничивается приведенными выше примерами. В работе [Кондратьев, Шмакова, 2019] представлены некоторые интересные и важные с практической точки зрения результаты, также достойные упоминания в настоящей монографии. В частности, выполнены прогностические оценки возможных изменений стока и выноса фосфора под воздействием климатических факторов для водосборов малых водных объектов, расположенных на частном водосборе Финского залива, к числу которых относятся Дудергофские озера и водохранилище Сестрорецкий Разлив. Показано, что удельная фосфорная нагрузка на единицу площади акватории Дудергофских озер, составляющая 1,22 т/(км² год), превышает аналогичное значение удельной нагрузки для Сестрорецкого Разлива (0,99 т/(км² год)). Причиной является различная степень сельскохозяйственной освоенности водосборов. В тоже время удалось количественно оценить закономерности и особенности массопереноса на акваториях указанных объектов.

Результаты применения 2D-модели течений и транспорта наносов в мелководном водоеме для решения задачи оценки заиления мелководного водохранилища Сестрорецкий Разлив, расположенного на северной границе Санкт-Петербурга, показали, что интенсивность намыва дна за счет поступающих речных наносов в северной части акватории составляет не более 3–4 мм/год. Возможные климатические изменения, приводящие к снижению водности, повлекут за собой уменьшение твердого стока притоков и, как следствие, снижение заиления водоема. В дальнейших работах по изучению заиления Разлива следует уделить внимание оценке осаждения на дно автохтонного вещества, образовавшегося непосредственно в экосистеме водоема.

С использованием той же 2D-модели, адаптированной к условиям озера Неро, проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации двух проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена и оздоровления озера Неро. Согласно первому решению, планировалась выемка донных отложений в пределах городской черты города Ростова с целью увеличения глубин в прибрежной зоне озера. Проведенные расчеты показали, что для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). Расход наносов же за счет увеличения площади поперечного сечения потока незначительно вырастет непосредственно на участке углубления. То есть никакого положительного эффекта настоящее действие не принесет. Второе проектное предложение должно было быть направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья основного притока реки Сары до истока реки Вексы. Расчеты показали, что увеличение глубины на указанной траектории при сохранении переносимого количества водных масс также приведет к уменьшению скорости течений. На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что практические реализации представленных проектных решений не только не приведут к улучшению водообмена в озере, но и наоборот, будут способствовать образованию застойных зон, особенно для первого проектного решения.

В 2022 г. сотрудники Лаборатории математических методов моделирования Кондратьев С.А. и Шмакова М.В. удостоены звания Лауреатов Макариевской премии по естественным наукам, а также первой премии в номинации «Научные исследования в области рационального природопользования, экологии и охраны окружающей среды» за монографию «Математическое моделирование

массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем» (рис.12.18), написанную в Институте озерадения РАН в 2018 г. и изданную при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-15-0000219) в 2019 г.

В 2023 г. начаты работы по созданию методики дистанционной оценки характеристик неизученных малых и средних озер северных территорий нашей страны на основе использования модели FLake, данных спутниковой съемки подстилающей поверхности, метеорологического реанализа и геостатистических зависимостей между морфометрическими характеристиками водоёмов арктических территории [Зверев, Голосов, Кондратьев, Расулова, 2023]. Более подробно указанное направление исследований отражено в главе 7.

Несмотря на ухудшение за последние годы условий научных исследований в ИНОЗ РАН сотрудники Лаборатории математических методов моделирования продолжают успешно решать стоящие перед Институтом задачи. Приведенные в настоящем разделе примеры являются подтверждением работоспособности детерминированно-стохастической модельной системы, созданной Лабораторией и ориентированной на количественную оценку и прогноз процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем».

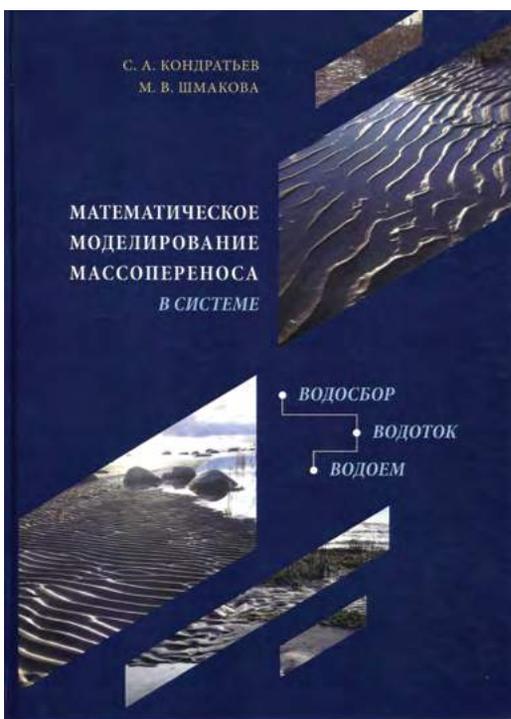


Рис. 12.18. Монография Кондратьева С.А. и Шмаковой М.В. «Математическое моделирование массопереноса...»

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

«Я вполне сознаю, что могу увлечься ложным, обманчивым, пойти по пути, который заведет меня в дебри; но я не могу не пойти по нему, мне ненавистны всякие оковы моей мысли, я не могу и не хочу заставить ее идти по дорожке, практически важной, но такой, которая не позволит мне хоть несколько более понять те вопросы, которые мучают меня... И это искание, это стремление – есть основа всякой научной деятельности».

Вернадский В.И.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 70 лет Институту озераедения РАН / Институт озераедения РАН. – СПб.: Свое издательство, 2017. – 252 с. ISBN 978-5-4386-1415-9.
2. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н. К палеолимнологии Ладожского озера / С.А. Абрамова, Н.Н. Давыдова // Известия Всесоюзного географического общества. – 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 / С.А. Абрамова, Н.Н. Давыдова, Д.Д. Квасов // История озер Северо-Запада / Ред. С.В. Калесник. – Л.: [б.и.], 1967. – С.113-132.
4. Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Влияние активизированных докембрийских разрывных нарушений на рельеф котловины Ладожского озера / А.О. Агибалов, А.А. Сенцов, В.А. Зайцев // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2019. – № 3. – С. 99-105.
5. Адаменко В.Н. Климат и озера / В.Н. Адаменко. – Л., Гидрометеиздат, 1985. – 264 с.
6. Алекин О.А. Основы гидрохимии / О.А. Алекин. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970. – 444 с.
7. Алекин О.А. Химический анализ вод суши: (При стационарном их изучении) / О.А. Алекин. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 199 с.
8. Алешина Д.Г., Курашов Е.А., Гусева М.А., Петрова Т. Н. Современное состояние зооплктона нижнего течения реки Уксунйоки (Северное Приладожье) / Д.Г. Алешина, Е.А. Курашов, М.А. Гусева, Т.Н. Петрова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2022. – № 6. – С. 121-132. DOI 10.17076/lim1580.
9. Алхименко А.П., Кудерский Л.А., Румянцев В.А., Соболев И.А. О концепции Федерального закона «Об охране Ладожского озера» / А.П. Алхименко, Л.А. Кудерский, В.А. Румянцев, И.А. Соболев // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата : Научные труды Выездного заседания Научного Совета РАН, Псков, 25–28 июня 2007 года / Институт озераедения РАН, ИПК «Прикладная экология». – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2007. – С. 192-226.
10. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Оценка внешней нагрузки на водные объекты в условиях урбанизированного ландшафта / Г.А. Алябина, И.Н. Сорокин // Экологические и метеорологические проблемы больших городов и промышленных зон: Всероссийская научная конференция, Санкт-Петербург, 16–18 ноября 1999 года. – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 1999. – С. 66-67.
11. Амантов А.В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера / А.В. Амантов // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 22-32.
12. Амантов А.В. Этапы геологического развития Ладожского озера / А.В. Амантов // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Российская Академия наук, Русское географическое общество. – СПб.: Всероссийская общественная организация «Русское географическое общество», 1993. – С. 5-13.
13. Амантов А.В., Амантова М.Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории / А.В. Амантов, М.Г. Амантова // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 5-14.
14. Андреев А. П. Ладожское озеро: В 2-х ч / А.П. Андреев, полк. Корпуса флотск. штурманов, начальника гидрогр. работ по исследованию Ладожского бассейна. – СПб.: тип. Морского министерства, 1875. – Ч. 1: 263 с., Ч. 2: 135 с.
15. Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зооплктона озерных экосистем разных трофических типов / И.Н. Андроникова. – СПб.: Наука, 1996. – 189 с.
16. Анохин В.М., Дудакова Д.С. Распространение песков тяжелой фракции в прибрежных отложениях Ладожского озера / В.М. Анохин, Д.С. Дудакова // Озера Евразии: проблемы и пути их решения : Материалы II Международной конференции, Казань, 19–24 мая 2019 года. Том Часть 1. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. – С. 224-228.
17. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Геоморфология и типизация берегов Ладожского

- озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата / В.М. Анохин, Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков // Геоморфология. – 2019. – № 1. – С. 25-37. DOI 10.31857/S0435-42812019125-37.
18. Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Рельеф дна Ладожского озера и его связь с дизъюнктивами / В.М. Анохин, М.А. Науменко, Н.А. Нестеров // Известия Русского географического общества. – 2016. – Т. 148, № 2. – С. 44-52.
 19. Анохин В.М., Петухов С.И., Науменко М.А. Сеть разломов дна Ладожского озера / В.М. Анохин, С.И. Петухов, М.А. Науменко // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 15–19 ноября 2021 года. – М.: ИО РАН, 2021. – Т. IV. – С. 180-185. DOI: 10.29006/978-5-6045110-7-7
 20. Антропогенное воздействие на малые озера / Ред. И.С. Коплан-Дикс, Е.А. Стравинская. – Л.: Наука, 1980. – 174 с.
 21. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975-2004 гг.) / Н.А. Петрова, И.В. Иофина, Л.Л. Капустина [и др.] // Экологическая химия. – 2005. – Т. 14, № 4. – С. 209-234.
 22. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Ред. Н.А. Петрова. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1982. – 304 с.
 23. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Э.М. Горелова, В.А. Кириллова, Т.И. Малинина [и др.]. – Л.: Наука: Ленингр. отделение, 1982. – 304 с.
 24. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и пути минимизации их негативных последствий / В.А. Румянцев, Н.И. Коронкевич, А.В. Измайлова [и др.] // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике : Материалы Международного научного семинара и 23-й сессии Объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при МААН и Научного совета по фундаментальным географическим проблемам РАН, Гродно-Минск, 04–07 июня 2019 года / Ред. В.С. Хомич. – Гродно-Минск: «СтройМедиа Проект», 2019. – С. 193-209.
 25. Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления): Материалы всесоюзного совещания. Ленинград, 27-29 марта 1990 г.: [В 2 кн.] / Редкол.: И.Н. Андроникова (отв. ред.) [и др.]. – СПб: Гидрометеиздат, 1991. – 394 с.
 26. Анучин Д.Н. Озера области истоков Волги и верховьев Западной Двины: (По исслед. 1894-95 гг.) / Д.Н. Анучин. – М.: Т-во тип. А.И. Мамонтова, 1898. – 56 с.
 27. Анучин. Д.Н. Воды суши / Д.Н. Анучин // Прил. к журн. «Землеведение» за 1896 г., кн. 2, 1896. – 24 с.
 28. Ассиновская Б.А. Сейсмические события на Ладоге в XX в / Б.А. Ассиновская // Известия Русского географического общества. – 2005. – Т. 137, № 4. – С. 70-77.
 29. Ассиновская Б.А., Карпинский В.В. Ладожские сейсмические явления / Б.А. Ассиновская, В.В. Карпинский // СПб: изд-во ВСЕГЕИ. (Федеральный исследовательский центр «Единая Геофизическая служба Российской академии наук»), 2020. – 46 с.
 30. Астраханцев Г.П., Егорова Н.Б., Руховец Л.А. Моделирование течений и термического режима Ладожского озера (препринт) / Г.П. Астраханцев, Н.Б. Егорова, Л.А. Руховец. – Л.: [б.и.], 1988. – 44 с.
 31. Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Писулин И.В., Руховец Л.А. Математическая модель для исследования реакции экосистемы Ладожского озера на изменение антропогенной нагрузки (препринт) / Г.П. Астраханцев, В.В. Меншуткин, И.В. Писулин, Л.А. Руховец. – СПб: [б.и.], 1992. – 44 с.
 32. Ахмедова Н.С., Рянжин С.В. Морфометрические особенности карстовых озер бассейна верхней и средней Волги / Н.С. Ахмедова, С.В. Рянжин // Известия Русского географического общества. – 2009. – Т. 141, № 6. – С. 41.
 33. Бакулина Л.П. Шлиховое опробование и анализ шлиховых проб : учеб. пособие / Л.П. Бакулина. – Ухта : Ухтин. гос. техн. ун-т, 2005. – 117 с. ISBN 5-88179-391-9.
 34. Беляков В.П., Бажора А.И. Зообентос водоемов Ижорского плато с повышенной минерализацией воды / В.П. Беляков, А.И. Бажора // Биологические ресурсы: изучение, использование, охрана: Материалы IV Всероссийской научной конференции. – Вологда: ВоГУ, 2018. – С. 8-14.
 35. Беляков В.П., Бажора А.И. Зообентос озер Ленинградской области и Санкт-Петербурга: влия-

- ние природных и антропогенных факторов / В.П. Беляков, А.И. Бажора // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016а. – Т. 18, № 2 (2). – С. 297-302.
36. Беляков В.П., Бажора А.И. Структурно-функциональные характеристики зообентоса озер, расположенных в природных и урбанистических ландшафтах Северо-Западного региона России / В.П. Беляков, А.И. Бажора // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2016б. – Т. 9, № 4. – С. 484-498.
 37. Берг Л.С. Аральское море: Опыт физико-геогр. монографии / Л.С. Берг. – СПб тип. М.М. Стасюлевича, 1908. – 580 с.
 38. Берг Л.С. Очерки по истории русских географических открытий / Акад. наук СССР. - 2-е изд., испр. и доп. – М.; Л.: Изд-во и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР в Л., 1949. – 467 с.
 39. Биологическая активность и состав метаболитов штамма *Streptomyces carpaticus* K-11 RСAM04697 (SCPM-O-B-9993), перспективного для использования в растениеводстве / Ю.В. Батаева, Л.Н. Григорян, А.Г. Богун [и др.] // Микробиология. – 2023. – Т. 92, № 3. – С. 318-328. DOI 10.31857/S0026365622600730.
 40. Биологическая продуктивность озера Красного и условия ее формирования / Ред. И.Н. Андроникова, К.А. Мокиевский; АН СССР, Сов. нац. ком. по Междунар. биол. программе, Ин-т озероведения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1976. – 208 с.
 41. Биологические ресурсы Ладожского озера (Зоология) / Ред. С.В. Калесник. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1968. – 227 с.
 42. Бискэ Ю.С., Сумарева И.В., Шитов М.В. Позднеголоценовое сейсмическое событие в юго-восточном Приладожье. I. Принципы исследования и деформационные текстуры / Ю.С. Бискэ, И.В. Сумарева, М.В. Шитов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2009. – № 1. – С. 3-25.
 43. Блохина Н.С. Влияние длительности ветрового воздействия на формирование течений и термобара в пресном водоеме в период таяния ледового покрова / Н.С. Блохина // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2018. – № 4. – С. 87-93.
 44. Богословский Б.Б. Озероведение: [Учеб. пособие для ун-тов] / Б.Б. Богословский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. – 335 с.
 45. Богословский Б.Б., Муравейский С.Д. Очерки по озероведению / Б.Б. Богословский, С.Д. Муравейский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1955. – 176 с.
 46. Бойнагрян В.Р., Сапелко Т.В., Габриелян И.Г., Севастьянов Д.В. Современная изученность истории высокогорных озер Армении / В.Р. Бойнагрян, Т.В. Сапелко, И.Г. Габриелян, Д.В. Севастьянов // Известия Русского географического общества. – 2018. – Т. 150, № 6. – С. 89-103. DOI 10.1134/S0869607118060071.
 47. Большие озера Кольского полуострова / Ред. Л.Ф. Форш, В.Г. Драбкова; АН СССР, Институт озероведения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1975. – 350 с.
 48. Большианов Д.Ю. Современные многолетние колебания уровня Ладожского озера и возможная причина Ладожской трансгрессии позднего голоцена / Д.Ю. Большианов // Известия Русского географического общества. – 2018. – Т. 150, № 4. – С. 15-31.
 49. Большое озеро как имитационная модель океана / К.Я. Кондратьев, В.Н. Адаменко, В.П. Влазов [и др.]; Институт озероведения Академии наук СССР. – Л.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1986. – 63 с.
 50. Борзенкова И.И., Борисова О.К., Жильцова Е.Л., Сапелко Т.В. Холодный эпизод около 8200 лет назад в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин / И.И. Борзенкова, О.К. Борисова, Е.Л. Жильцова, Т.В. Сапелко // Лёд и снег. – 2017. – Т. 57, № 1. – С. 117-132. DOI 10.15356/2076-6734-2017-1-117-132.
 51. Верещагин Г.Ю. Байкал: науч.-попул. очерк / Байкальская лимнол. Станция Акад. наук СССР. – Иркутск: Иркут. обл. изд-во, 1947. – 171 с.
 52. Верещагин Г.Ю. Методы морфометрической характеристики озер / Г.Ю. Верещагин // Труды Олонецкой научной экспедиции. – Государственный гидрологический институт. Ч. 2: География, вып. 1, 1930. – 115 с.
 53. Верещагин Г.Ю. Методы полевого гидрохимического анализа в их применении к гидрологической практике / Г.Ю. Верещагин. – 2-е перераб. и доп. изд. – Л.: изд-во и тип. Гос. гидрол. ин-т, 1933. – 128 с.

54. Винберг Г.Г. Опыт изучения фотосинтеза и дыхания в водной массе озера. К вопросу о балансе органического вещества / Г.Г. Винберг // Лимнологическая станция (Косино). Труды Лимнологической станции в Косине. – 1934. – Вып.18. – С. 5-24.
55. Влияние изменений климата на экосистемы озер / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, В.Н. Баклагин [и др.] // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. – 2013. – № 2(78). – С. 43-50.
56. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 34. – С. 48-55.
57. Влияние фульвокислоты на яйценоскость пчелиных маток в весенний период и продуктивность пчелосемей / В.А. Румянцев, Г.С. Ярошевич, Г.С. Мазина [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 510, № 1. – С. 112-116. DOI 10.31857/S268673972360011X.
58. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на Дудергофские озера / А.В. Терехов, Н.С. Обломкова, М.В. Шмакова [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2019. – № 54. – С. 58-72. DOI 10.33933/2074-2762-2019-54-58-72.
59. Водные объекты в условиях интенсивного техногенеза / С.А. Кондратьев, Г.Т. Фрумин, Т.П. Тройская [и др.] // Региональная экология. – 1997. – № 3-4. – С. 30-40.
60. Водные объекты в условиях интенсивного техногенеза: методология мониторинга и критерии допустимой нагрузки: Результаты исследований, выполненных по проекту РФФИ № 96-05-64166 / С.А. Кондратьев, Т.П. Гронская, Л.В. Ефремова [и др.]. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 1998. – 68 с.
61. Водные объекты в условиях техногенеза: методология мониторинга и критерии допустимой нагрузки / С.А. Кондратьев, Т.П. Гронская, Л.В. Ефремова. – Изд. НИИХ СПбГУ, 1998. – 68 с.
62. Водные объекты мегаполисов: критерии экологического состояния и концепция рационального управления / С.А. Кондратьев, Т.П. Гронская, С.Э. Глухова [и др.]. – СПб: НИИ химии СПбГУ, 2001. – 53 с.
63. Водные объекты Санкт-Петербурга / Ред. С.А. Кондратьев, Г.Т. Фрумин; Администрация Санкт-Петербурга, Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. – СПб.: Символ, 2002. – 348 с. ISBN 5-323-00032-5.
64. Волошко Л.Н., Пиневиц А.В. Разнообразие токсинов цианобактерий / Л.Н. Волошко, А.В. Пиневиц // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 1(27). – С. 68-80.
65. Воспроизводство рыб и беспозвоночных при воздействии загрязняющих веществ / Е.А. Курашов, Н.М. Аршаница, А.А. Стекольников [и др.] // Международный вестник ветеринарии. – 2020. – № 3. – С. 105-115. DOI 10.17238/issn2072-2419.2020.3.105.
66. Гаврилица А.О., Папук В.В., Кондратьев С.А. Рекомендации по обоснованию эрозионно-допустимых норм, противоэрозионных мероприятий и расчету стока от естественных осадков / А.О. Гаврилица, В.В. Папук, С.А. Кондратьев. – Кишинев: Карта Молдовеняскэ, 1990. – 62 с.
67. Газизова Т.Ю., Сапелко Т.В. Обоснование значения пыльцы макрофитов для палеолимнологических реконструкций на примере озер острова Лункулансаари (северо-восток Ладожского озера) / Т.Ю. Газизова, Т.В. Сапелко // Биосфера. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 231-241. DOI 10.24855/biosfera.v12i4.566.
68. Геоэкология Ладожского озера / В.И. Гуревич, И.В. Куликов, Т.Ю. Михалок [и др.] // Ред. В.Л. Иванов, В.И. Гуревич; ВНИИ геологии и минер. ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология). – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. – 209 с.
69. Гидробиология озер Воже и Лача: В связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг / Ред. И.М. Распопов. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1978. – 276 с.
70. Гидрология озер Воже и Лача (в связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги) / Ред. Т.И. Малинина. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979. – 288 с.
71. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом / А. Ю. Тержевик, Н. И. Пальшин, С. Д. Голосов [и др.] // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37, № 5. – С. 568-579.

72. Гладышев М.И., Колмаков В.И., Кравчук Е.С. Прорастание акинет цианобактерий из донных отложений в эксперименте в водах «цветущего» и «нецветущего» водоемов / М. И. Гладышев, В. И. Колмаков, Е. С. Кравчук // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 378, № 1. – С. 134-137.
73. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве (ред. от 26.06.2017) / разработаны Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии» Федерального медико-биологического агентства. – Изд. офиц. – Изм. – М.: Роспотребнадзор, 2018. – 5 с.
74. ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 18 мая 2009 г., № 32. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 10 с.
75. Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D- модели гидродинамики Внутреннего моря (МГВМ) / С.Д. Голосов, И.С. Зверев, Е.А. Шипунова // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – С. 166–196.
76. Голоценовая история озер на острове Хачин (Селигер) / Т.В. Сапелко, М.А. Науменко, Д.Д. Кузнецов [и др.] // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. – 2021. – № 79. – С. 71-90. DOI 10.34756/GEOS.2022.17.38241.
77. Государственная геологическая карта Российской Федерации: Р-35-XXIV, Р-36-XIX (Сортавала) / Сост. ГГУП «СФ Минерал» ; Подгот. электрон. изд. Московский филиал ФГУП «ВСЕГЕИ» Авт.: К.И. Степанов [и др.]. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.
78. Грибин С.В. Формальная физика: уравнения движения / С.В. Грибин. – СПб.: Изд-во «Лема», 2013. – 300 с. – ISBN 978-5-98709-602-4.
79. Гузева А.В., Елизарова И.Р., Лапенков А.Е., Слуковский З.И. Фракции металлов в отложениях озер зоны многолетней мерзлоты севера Сибири, дельта р. Лены / А.В. Гузева, И.Р. Елизарова, А.Е. Лапенков, З.И. Слуковский // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2022. – Т. 68, № 2. – С. 160-172. DOI 10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172.
80. Гузева А.В., Слуковский С.И. Геохимическая характеристика гуминовых кислот, выделенных из отложений тундровых озер Мурманской области / А.В. Гузева, З.И. Слуковский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 1. – С. 78-92. DOI 10.35567/19994508_2023_1_6.
81. Гузева А.В., Федорова И.В. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях озер острова Самойловский, дельта реки Лены / А.В. Гузева, И.В. Федорова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 9. – С. 18-29. DOI 10.17076/lim1235.
82. Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Науменко М.А. Опыт создания и использования банка термических данных Ладожского озера / В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников, М.А. Науменко // География и природные ресурсы. – 1998. – № 3. – С. 89-96.
83. Гузиватый В.В., Науменко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции / В.В. Гузиватый, М.А. Науменко, В.А. Румянцев // Исследование Земли из космоса. – 2020. – № 1. – С. 20-30. DOI 10.31857/S0205961420010042.
84. Гузиватый, В.В., Науменко М.А. Течения на поверхности Ладожского озера на основе последовательных ИК-спутниковых съемок / В.В. Гузиватый, М.А. Науменко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 232-243.
85. Гуревич Ф.А. Фитонциды водных и прибрежных растений, их роль в гидробиоценозах: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук : специальность 03.00.18 / Гуревич Файва Абрамович. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т им. А.А. Жданова, 1973. – 30 с.
86. Гусаков Б.Л., Тержевик А.Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах / Б.Л. Гусаков, А.Ю. Тержевик // Ладожское озеро – критерии состояния

- экосистемы. – СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1992. – С. 21–26.
87. Гусева М.А., Кузнецов Д. Д., Сапелко Т.В. Элементный состав донных отложений Среднего Суздальского озера / М.А. Гусева, Д.Д. Кузнецов, Т.В. Сапелко // Вопросы естествознания. – 2018. – № 1(15). – С. 57-62.
88. Гутельмахер Б.Л. Метаболизм планктона как единого целого / Б.Л. Гутельмахер. – Л.: Наука, 1986. – 155 с.
89. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли - индикаторы природных условий водоемов в голоцене / Н.Н. Давыдова. – Л.: Наука, 1985. – 243 с.
90. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли в поверхностном слое донных отложений Псковско-Чудского озера / Н.Н. Давыдова // Донные отложения Псковско-Чудского озера. – Таллин, 1981. – С. 56-73.
91. Давыдова Н.Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса / Н.Н. Давыдова // Известия Всероссийского Географического общества. – 1961. – Т. 93, № 3. – С. 221-228.
92. Давыдова Н.Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера / Н.Н. Давыдова // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л.: «Наука», 1968. – С. 131-174.
93. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Кукконен М., Симола Х. Антропогенное воздействие на геосистему Ладожского озера по материалам многолетнего мониторинга донных отложений / Н.Н. Давыдова, Д.А. Субетто, М. Кукконен, Х. Симола // Известия Русского географического общества. – 1997. – Т. 129, № 6. – С. 48-58.
94. Демидов Н.Э., Гузева А.В. Озера полюса ветров Антарктиды (ст. Русская) / Н.Э. Демидов, А.В. Гузева // Российские полярные исследования. – 2022. – № 1(47). – С. 19-22.
95. Демидов Н.Э., Гузева А.В., Лапенков А.Е. На снегоходе от Воркуты через Полярный Урал в ямальскую тундру / Н.Э. Демидов, А.В. Гузева, А.Е. Лапенков // Российские полярные исследования. – 2022. – № 3(49). – С. 18-23.
96. Доманицкий А.П., Дубровина Р.Г., Исаева А.И. Реки и озёра Советского Союза / А.П. Доманицкий, Р.Г. Дубровина, А.И. Исаева. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 104 с.
97. Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Изменение состояния вод крупнейших озер и водохранилищ России / В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова // География и природные ресурсы. – 2014. – № 4. – С. 22-29.
98. Драбкова В.Г., Сорокин И.Н. Озеро и его водосбор - единая природная система / В.Г. Драбкова, И.Н. Сорокин. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979. – 195. с.
99. Древняя российская гидрография, Содержащая описание Московскаго государства рек, протоков, озер, кладязей, и какие по ним города и урочища, и на каком оныхъ разстоянии / Изданная Николаем Ивановичем Новиковым В Санктпетербурге : [Тип. Акад. наук], 1773. – 233 с. – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003335641?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 02.05.2023).
100. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О. Донные ландшафты Ладожского озера / Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, М.О. Дудаков // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 136-146.
101. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков О.М. Использование необитаемого подводного аппарата для исследования бентофауны сублиторали и профундали Ладожского озера / Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, О.М. Дудаков // Морские исследования и образование (MARESEDU-2019) : Труды VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 28–31 октября 2019 года. Том II (III). – М.: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – С. 420-423.
102. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.М. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера / Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков, В.И. Анохин // Российский журнал прикладной экологии. – 2018. – № 4(16). – С. 51-55.
103. Дудакова Д.С., Юдин С.Н. Цифровая модель подводных ландшафтов Ладожского озера как источник интегрированной информации о состоянии дна / Д.С. Дудакова, С.Н. Юдин // Геоморфология. – 2022. – Т. 53, № 2. – С. 13-26. DOI 10.31857/S0435428122020055

104. Еленкин А.А. О годовой смене фитопланктона во 2-м озере в Озерках (окр.Ленинграда) / А.А. Еленкин // Ботан. мат-лы Ин-та Спор. раст. Гл. Бот. сада РСФСР. – 1924. – Т. 3, Вып. 1-12. – С. 56-62.
105. Елисеев А.Н., Багута М.Ю., Белова С.С., Степанов А.А. Химический состав и биологические свойства сапропеля / А.Н. Елисеев, М.Ю. Багута, С.С. Белова, А.А. Степанов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 1. – С. 65-67.
106. Загребин А.О., Румянцев В.А., Тонкопий В.Д. Использование методов биотестирования и биоидентификации ксенобиотиков для оценки состояния водных экосистем / А.О. Загребин, В.А. Румянцев, В.Д. Тонкопий // Общество. Среда. Развитие. – 2014. – № 1(30). – С. 157-160.
107. Зверев И.С., Голосов С.Д., Кондратьев С.А., Расулова А.М. Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер материковой части Российской тундры / И.С. Зверев, С.Д. Голосов, С.А. Кондратьев, А.М. Расулова // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. – 2023. – Т. 511, № 2. – С. 120–126.
108. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море / Р.А. Ибраев. – М.: Изд-во «ГЕОС», 2008. – 127 с.
109. Иванова Е.В., Тихонова Д.А. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере / Е.В. Иванова, Д.А. Тихонова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2022. – № 6. – С. 58-67. DOI 10.17076/lim1582
110. Игнатъева Н.В. Анализ сезонной динамики гидрохимических характеристик озерных экосистем разных ландшафтов Карельского перешейка, подверженных антропогенному воздействию / Н.В. Игнатъева // Региональная экология. – 2018. – № 4(54). – С. 62-70.
111. Игнатъева Н.В. Гидрохимическая характеристика трех озерно-речных систем Санкт-Петербурга и Ленинградской области / Н.В. Игнатъева // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана: Материалы лекций II-й Всероссийской школы-конференции, Борок, 18–22 ноября 2014 года. Том II. – Борок: Общество с ограниченной ответственностью «Филигрань», 2014. – С. 165-168.
112. Игнатъева Н.В. Комплексный подход к разработке природоохранных и оздоровительных мероприятий на городских прудах / Н.В. Игнатъева // Mieux comprendre les etangs : Experiences nationales et internationales Du Berry Limousin a la Europe Orientale. Национальный и международный опыт исследования прудов на территории Франции и Восточной Европы – Brive Editions “Les Monedieres”, 2015a. – С. 277-286.
113. Игнатъева Н.В. Научно обоснованный подход к разработке природоохранных и оздоровительных мероприятий на водоемах урбанизированных территорий / Н.В. Игнатъева // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года: сборник научных трудов, Петрозаводск, 06–11 июля 2015 года. Том 1. – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2015б. – Т. II. – С. 99-105.
114. Игнатъева Н.В. Особенности динамики биогенных элементов в карбонатных водах в условиях урбанизированного ландшафта (на примере Дудергофской системы, г. Санкт-Петербург) / Н.В. Игнатъева // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод : Материалы научной конференции с международным участием, Ростов-на-Дону, 08–10 сентября 2015 года / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Федеральное Государственное бюджетное учреждение Гидрохимический институт. Том Часть 1. – Ростов-на-Дону: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт», 2015в. – С. 54-58.
115. Измайлова А.В. Водные ресурсы озер России / А.В. Измайлова // География и природные ресурсы. – 2016а. – № 4. – С. 5-14. DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2016-4(5-14).
116. Измайлова А.В. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал / А.В. Измайлова. – СПб.: Папирус, 2018а. – 288 с. ISBN 978-5-6040240-9-6.
117. Измайлова А.В. Озерные водные ресурсы Азиатской части Российской Федерации / А.В. Измайлова // Водные ресурсы. – 2018б. – Т. 45, № 5. – С. 453-462. DOI 10.1134/S0321059618050097.
118. Измайлова А.В. Озерные водные ресурсы европейской части Российской Федерации / А.В. Измайлова // Водные ресурсы. – 2016б. – Т. 43, № 2. – С. 122-133. DOI 10.7868/S0321059616020036.

119. Измайлова А.В. Расулова А.М. Возможности применения математического аппарата при анализе озер на предмет их уникальности / А.В. Измайлова, А.М. Расулова // Геология, геозология, эволюционная география: коллективная монография / Министерство просвещения Российской Федерации, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. Том XIX. – СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2020. – С. 263-266.
120. Измайлова А.В. Удельная водообеспеченность и озерный фонд регионов водного дефицита / А.В. Измайлова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2019. – № 5. – С. 6-24.
121. Измайлова А.В., Корнеенкова Н.Ю. Экологическое картографирование водных ресурсов озер России как возможность визуализации данных по количественным и качественным характеристикам / А.В. Измайлова, Н.Ю. Корнеенкова // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения: Сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН, Сочи, 02–07 октября 2017 года / Институт водных проблем Российской академии наук, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. – Сочи: ООО «Лик», 2017. – С. 363-368.
122. Измайлова А.В., Корнеенкова Н.Ю. Озера, обладающие охранным статусом / А.В. Измайлова, Н.Ю. Корнеенкова // Заповедники и национальные парки – научно-исследовательские лаборатории под открытым небом: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Петрозаводск, 12–14 октября 2021 года / Отв. редактор Н.В. Ильмаст. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2021. – С. 24-26.
123. Измайлова А.В., Расулова А.М., Шмакова В.Ю. Выделение озер, обладающих уникальными свойствами, статистическими методами / А.В. Измайлова, А.М. Расулова, В.Ю. Шмакова // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 62. – С. 27-51. DOI 10.33933/2074-2762-2021-62-27-51.
124. Измайлова А.В., Ульянова Т.Ю. Информационная система «Озера России» / А.В. Измайлова, Т.Ю. Ульянова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 6. – С. 21-28.
125. Измайлова А.В., Шмакова М.В. Временная изменчивость водных ресурсов озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения / А.В. Измайлова, М.В. Шмакова // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Москва, 15–18 сентября 2015 года. – Москва, 2015. – С. 69-73.
126. Изучение метаболитов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений / Ю.В. Батаева, Л.Н. Григорян, Е.А. Курашов [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 172-178. DOI 10.25750/1995-4301-2021-3-172-178.
127. Индикаторы состояния водоемов Санкт-Петербурга / С.А. Кондратьев, Т.П. Гронская, Н.В. Игнатъева [и др.] // Экологическая химия. – 2000. – Т. 9, № 4. – С. 230-235.
128. Инновационная технология переработки сапропеля, уникальная эффективность и безопасность новой продукции / В.А. Румянцев, А.С. Митюков, А.О. Загребин [и др.] // Общество. Среда. Развитие. – 2016. – № 3(40). – С. 120-124.
129. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области: опыт создания системы поддержки принятия решений / А.Ф. Алимов, О.А. Андреев, Г.П. Астраханцев [и др.]; Утверждено к печати Объединенным Научным Советом «Экология и природные ресурсы» Санкт-Петербургского Научного Центра РАН. – СПб.: Vorey Print, 2001. – 419 с. ISBN 5-7187-0367-1.
130. Информационно-моделирующий комплекс для оценки гидроэкологического состояния водохранилищ / Ю.Г. Мотовилов, С.Д. Голосов, Ю.С. Даценко [и др.] // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 567-578. DOI 10.31857/S0321059620050132.
131. Информационно-моделирующий комплекс на основе математических моделей формирования водного и химического стока в системе «водосбор – водоем» (на примере Куйбышевского водохранилища) / Ю.Г. Мотовилов, С.Д. Голосов, Ю.С. Даценко [и др.] // Диффузное загрязнение

- водных объектов: проблемы и решения / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем РАН. – М.: Российская академия наук, 2020. – С. 456-473.
132. Исаченко А.Г. Ландшафты / А.Г. Исаченко // Природа Ленинградской области и ее охрана. – Л.: Лениздат, 1983. – С. 164-175.
 133. Исаченко А.Г., Карнаухова Е.В., Дашкевич З.В. Физико-географическое районирование Северо-Запада СССР / Ред. А.Г. Исаченко; Ленингр. ордена Ленина гос. ун-т им. А.А. Жданова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1965. – 248 с.
 134. Использование шпината (*Spinacia oleracea*), выращенного в условиях многоярусной фитофермы, в составе полуфабрикатов из мяса птицы / С.И. Лоскутов, Я.В. Пухальский, А.С. Митюков [и др.] // Все о мясе. – 2022. – № 6. – С. 38-43. DOI 10.21323/2071-2499-2022-6-38-43.
 135. Исследование влияния местоположения выпусков Юго-западных очистных сооружений, Красносельской станции аэрации, Центральной станции аэрации, Северной станции аэрации, КОС г. Петродворца, КОС г. Сестрорецка, КОС г. Зеленогорска на состояние «Невской губы» / СПб, ИНОЗ РАН, Договор № 855/03 с ГУП Водоканал. – СПб, 2005. – 268 с.
 136. История и методика палеолимнологических исследований / Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова, Д.Д. Кузнецов [и др.] // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 54-59.
 137. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР) / Д.Д. Квасов, Г.Г. Мартинсон, А.В. Раукас. – Л.: Наука, 1980. – 280 с.
 138. История озера Глубокое (Московская область) по результатам анализа донных отложений / Т. В. Сапелко, Н. Н. Смирнов, К. Щерочиньска [и др.] // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 450, № 3. – С. 344. DOI 10.7868/S0869565213140235.
 139. История озера Канозеро в позднеледниковье и голоцене на юге Кольского полуострова (Северо-Запад России) / Т.В. Сапелко, Д.Д. Кузнецов, А.В. Лудикова [и др.] // Геоморфология. – 2022. – Т. 53, № 3. – С. 29-38. DOI 10.31857/S0435428122030154.
 140. Калесник С.В. Ладожское озеро / С.В. Калесник. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 159 с.
 141. Калесник С.В. О географической лимнологии / С.В. Калесник // История озер Северо-Запада / Ред. С.В. Калесник. – Л.: [б.и.], 1967. – С. 5-7.
 142. Калининкова Т.Б., Гайнутдинов М.Х., Шагидуллин Р.Р. Цианотоксины – потенциальная опасность для пресноводных экосистем и здоровья человека / Т.Б. Калининкова, М.Х. Гайнутдинов, Р. Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. – 2017. – № 2(10). – С. 3-19.
 143. Каретников С.Г., Науменко М.А. Установление связей между характеристиками весенней термической зоны и внешними воздействиями / С.Г. Каретников, М.А. Науменко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – Москва: Российская академия наук, 2021. – С. 220-224.
 144. Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей восточной Европы / Д.Д. Квасов; АН СССР, Ин-т озераедения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1975. – 278 с.
 145. Кирпенко Н.И. Аллелопатическое взаимовлияние пресноводных водорослей / Н.И. Кирпенко; Нац. акад. наук Украины, Ин-т гидробиологии. – Киев: Наук. думка, 2013. – 254 с.
 146. Киселев Е.Ю., Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Применение ультразвукового излучения низкой интенсивности для борьбы с «цветением» воды в водоемах. Механизмы воздействия на водоросли / Е.Ю. Киселев, В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014а. – № 34. – С. 115-122.
 147. Киселев Е.Ю., Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Применение ультразвукового излучения низкой интенсивности для борьбы с «цветением» воды в водоемах. Эффективность воздействия на водоросли и другие организмы / Е.Ю. Киселев, В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014б. – № 37. – С. 222-230.
 148. Климат Северо-Запада России на рубеже плейстоцена и голоцена / Д.А. Субетто, Н.Н. Давыдова, Т.В. Сапелко [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2003. – № 5. – С. 80-91.

149. Климатические и антропогенные факторы в истории формирования малых озер на примере комплексного палеолимнологического исследования озера Берестового на Карельском перешейке / Т.В. Сапелко, Н.В. Игнатьева, Д.Д. Кузнецов [и др.] // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов IV Всероссийской научной конференции с международным участием*, Москва, 15–18 сентября 2015 года. – Москва: Институт водных проблем Российской академии наук, 2015. – С. 259-262.
150. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на о-ве Путсаари) / А.В. Лудикова, Д.А. Субетто, Н.Н. Давыдова [и др.] // *Известия Русского географического общества*. – 2005. – Т. 137, № 6. – С. 34-40.
151. Комов В.Т., Лазарева В.И., Степанова И.К. Антропогенное закисление малых озер Севера европейской России / В.Т. Комов, В.И. Лазарева, И.К. Степанова // *Биология внутренних вод*. – 1997. – № 3. – С. 5-17.
152. Комплексная оценка экологического состояния городских водоемов при антропогенном воздействии / Н.В. Игнатьева, В.П. Беляков, А.О. Загребин [и др.] // *Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем II: Сборник материалов международной конференции*, Санкт-Петербург, 10–14 октября 2011 года. – СПб.: Типография Любавич, 2011. – С. 59-67.
153. Комплексный дистанционный мониторинг озер / Ред. К.Я.Кондратьев. – Л.: Наука, 1987. – 288 с.
154. Комулайнен С.Ф. Экология фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии / С.Ф. Комулайнен ; Карел. науч. центр Рос. акад. наук, Ин-т биологии. – Петрозаводск: Ин-т биологиии КарНЦ РАН, 2004. – 181 с. ISBN 5-9274-0142-2.
155. Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В., Мокиевский К.А. Совещание специалистов социалистических стран по программе «Внутренние водоемы» / К.Я. Кондратьев, В.В. Мелентьев, К.А. Мокиевский // *Исследование Земли из космоса*. – 1989. – № 3. – С.136-138.
156. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Дистанционные методы слежения за качеством природных вод / К.Я. Кондратьев, Д.В. Поздняков – Л.: Наука, 1985. – 62 с.
157. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С.А. Кондратьев; Российская академия наук, Ин-т озероведения. – СПб.: Наука, 2007. – 252 с.
158. Кондратьев С.А. Использование данных дистанционного зондирования при математическом моделировании водосборов / С.А. Кондратьев; АН СССР, Ин-т озероведения. – Препр. – Л.: [б. и.], 1987. – 59 с.
159. Кондратьев С.А. К вопросу о создании научного обоснования системы рационального управления водоемами Санкт-Петербурга / С.А. Кондратьев // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2000. – № 3(4). – С. 71-79.
160. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С.А. Кондратьев; Российская академия наук, Ин-т озероведения. – СПб.: Наука, 2007. – С. 255. ISBN 978-5-02-025171-7.
161. Кондратьев С.А., Игнатьева Н.В. Оперативный контроль экологического состояния городских прудов / С.А. Кондратьев, Н.В. Игнатьева // *Mieux comprendre les etangs : Experiences nationales et internationales Du Berry Limousin a la Europe Orientale. Национальный и международный опыт исследования прудов на территории Франции и Восточной Европы – Brive Editions “Les Monedieres”*, 2015. ISBN 978-2-36340-117-5. – С. 256-256.
162. Кондратьев С.А., Игнатьева Н.В., Каретников С.Г. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на водоем на примере водохранилища Сестрорецкий Разлив / С.А. Кондратьев, Н.В. Игнатьева, С.Г. Каретников // *Региональная экология*. – 2016. – № 4 (46). – С. 59-70.
163. Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В. Метод оценки выноса биогенных веществ с водосборов и биогенной нагрузки на водные объекты Северо – западного региона Российской Федерации / С.А. Кондратьев, М.В. Казмина, М.В. Шмакова. – СПб.: Изд-во ЛЕМА, 2011. – 20 с.
164. Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты / С.А. Кондратьев, Д.А. Максимов, М.В. Шмакова, В.И. Уличев // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. – 2014. – № 35. – С. 165-177.

165. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 52. – С. 88-101.
166. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Изменение стока и биогенного выноса малыми притоками Финского залива в результате возможных изменений регионального климата / С.А. Кондратьев, М. В. Шмакова // Метеорология и гидрология. – 2022а. – № 6. – С. 56-65. DOI 10.52002/0130-2906-2022-6-56-65.
167. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова ; Рекомендовано к опубликованию решением Ученого совета ИНОЗ РАН от 11 мая 2018 г. – СПб.: ООО «Нестор-История», 2019. – 248 с. ISBN 978-5-4469-1577-4.
168. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 42. – С. 24-32.
169. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Распространение загрязнения в русле реки Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне токсичных отходов Красный Бор / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Водные ресурсы. – 2022б. – Т. 4, № 6. – С. 728-738. DOI 10.31857/S0321059622060074.
170. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Голосов С.Д., Зверев И.С. Моделирование тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем» / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, С.Д. Голосов, И. С. Зверев // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 40-52. DOI 10.17076/lim1390.
171. Кононова М.М. Органическое вещество почвы: его природа, свойства и методы изучения / М.М. Кононова // Акад. наук СССР. Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. – 314 с.
172. Корнева Л.Г. Инвазии чужеродных видов планктонных водорослей в пресных водах Голарктики (обзор) / Л.Г. Корнева // Российский журнал биологических инвазий. – 2014. – Т.7, № 1. – С. 9-37.
173. Корнеевкова Н.Ю. Особенности заболачивания побережья Ладожского озера в голоцене / Н.Ю. Корнеевкова // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 93-97.
174. Корнеевкова Н.Ю. Оценка многолетней динамики площадей озер юга Западной Сибири по данным спутниковых снимков / Н.Ю. Корнеевкова // Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика): Материалы VI Международной конференции молодых ученых, Петрозаводск, 01–05 сентября 2020 года. – Петрозаводск: Карельский Научный центр РАН, 2020. – С. 25-28.
175. Корнеевкова Н.Ю., Измайлова А.В. Использование данных современной оценки озерного фонда Российской Федерации при картировании водной поверхности на примере Ханты-Мансийского автономного округа / Н.Ю. Корнеевкова, А.В. Измайлова // География: развитие науки и образования: Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной году экологии в России, 220-летию Герценовского университета, 85-летию факультета географии, 145-летию со дня рождения профессора Владимира Петровича Буданова, Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2017 года. Часть 1. – СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2017. – С. 254-256.
176. Корнеевкова Н.Ю., Измайлова А.В. Использование космической информации при оценке морфометрических характеристик озер и построении карт озерности и густоты озерной сети / Н.Ю. Корнеевкова, А. В. Измайлова // Региональная экология. – 2019. – № 2(56). – С. 43-50. DOI 10.30694/1026-5600-2019-2-43-50.
177. Корнеевкова Н.Ю., Расулова А.М. Выявление уникальных озер особо охраняемых природных территорий Ишимской равнины с использованием геоинформационных систем / Н.Ю. Корнеевкова, А.М. Расулова // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 49-54. DOI 10.17513/use.37949.
178. Корнеевкова Н.Ю. Изучение динамики площадей озер зоны недостаточного увлажнения по космическим снимкам / Н.Ю. Корнеевкова // География: развитие науки и образования: Кол-

- лективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 155-летию со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского, Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2018 года / Ред. В.П. Соломин, В.А. Румянцев, Д.А. Субетто, Н.В. Ловелиус. Том 1. – СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2018. – С. 138-141.
179. Корнеенкова Н.Ю., Измайлова А.В. Изучение пространственной и временной неоднородности озерного водного покрытия регионов недостаточного увлажнения по космическим снимкам / Н.Ю. Корнеенкова, А.В. Измайлова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 106-115. DOI 10.24057/2414-9179-2018-2-24-106-115.
180. Косов В.И. Сапропель. Ресурсы, технологии, геоэкология / В.И. Косов. – СПб.: Наука. – 2007. – 227 с.
181. Котрехов Е.П. Численное моделирование гидравлического режима сложных озерно-речных систем (на примере р. Вуоксы) / Е.П. Котрехов // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 3. – С. 273-285.
182. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации / Н.В. Кочков, С.В. Рянжин // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43, № 1. – С. 18. DOI 10.7868/S0321059616010107.
183. Кошечкин Б.И. Голоценовая тектоника восточной части Балтийского щита / Б.И. Кошечкин. – Л.: Наука, 1979. – 160 с.
184. Крейман К.Д. Лабораторное моделирование турбулентного вовлечения в кольцевом бассейне с обдувом водной поверхности // Докл. АН СССР. – 1988. – 303:2. – С. 315–319.
185. Крылова Ю.В., Курашов Е.А., Митрукова Г.Г. Компонентный состав эфирного масла *Potamogeton perfoliatus* L. Из Ладожского озера в начале периода плодоношения / Ю.В. Крылова, Е.А. Курашов, Г.Г. Митрукова // Химия растительного сырья. – 2016. – № 2. – С. 79-88. <http://dx.doi.org/10.14258/jcprm.2016021189>.
186. Крылова Ю.В. Пространственные и сезонные закономерности распределения природных метаболитов и других химических соединений в воде Ладожского озера, определяемых методами газохроматографического анализа: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук : специальность 11.00.11. / Крылова Юлия Викторовна. – СПб.: Институт озероведения РАН, 1999. – 20 с.
187. Крылова Ю.В., Курашов Е.А., Русанов А.Г. Сравнительный анализ компонентного состава низкомолекулярного метаболома горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre) из разнотипных местообитаний в Ладожском озере / Ю.В. Крылова, Е.А. Курашов, А.Г. Русанов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 4. – С. 95-114. DOI 10.17076/lim1141.
188. Крылова Ю.В., Новиченко О.В., Курашов Е.А. Компонентный состав низкомолекулярного метаболома и антиоксидантная активность *Potamogeton perfoliatus* L. (*Potamogetonaceae*), произрастающего в Астраханской области / Ю.В. Крылова, О.В. Новиченко, Е.А. Курашов // Химия растительного сырья. – 2022. – № 4. – С. 141-151. DOI 10.14258/jcprm.20220411179.
189. Крышнякова О.С., Малинин В.Н. К анализу трендов в колебаниях температуры воздуха и осадков на Европейской территории России / О.С. Крышнякова, В.Н. Малинин // Известия Русского географического общества. – 2009. – Т. 141, № 2. – С. 23-30.
190. Кудерский Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А. Позднеплейстоценовая и голоценовая история озера / Л.А. Кудерский, Т.В. Сапелко, Д.А. Субетто // Ладога / Ред. В.А.Румянцев, С.А. Кондратьев; Институт озероведения РАН. – СПб: ООО «Нестор-История», 2013. – С. 14-22.
191. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Голоценовое накопление органического вещества в донных отложениях Ладожского озера / Д.Д. Кузнецов, Д.А. Субетто // Геоморфология. – 2021. – Т. 52, № 2. – С. 63-71. DOI 10.31857/S043542812102005X.
192. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Тифрохронология и ее применение в палеолимнологии / Д.Д. Кузнецов, Д.А. Субетто // Известия Русского географического общества. – 2004. – Т. 134, № 5. – С. 79-82.
193. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка / Д.Д. Кузнецов, Д.А. Субетто. Институт озероведения. – М.: ООО «Издательство ГЕОС», 2019. – 120 с. ISBN 978-5-89118-801-3

194. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Лудикова А.В. Соединение Ладожского озера с Балтийским морем в позднем голоцене – новые палеолимнологические данные / Д.Д. Кузнецов, Д.А. Субетто, А.В. Лудикова // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 506, № 1. – С. 111-116. DOI 10.31857/S2686739722600746.
195. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Сапелко Т.В., Лудикова А.В. Гидрографическая сеть северной части Карельского перешейка в голоцене по данным о строении отложений малых озер / Д.Д. Кузнецов, Д.А. Субетто, Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова // Геоморфология. – 2015. – № 1. – С. 54-69. DOI 10.15356/0435-4281-2015-1-54-69.
196. Курашов Е.А. Мейобентос как компонент озерной экосистемы / Е.А. Курашов; Институт озерадения РАН. – СПб.: «Алга-Фонд» Ассоциации «Алга», 1994. – 224 с.
197. Курашов Е.А. Мейобентос профундали и закономерности его изменения / Е.А. Курашов // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Ред. В.А. Румянцев, В.Г. Дробкова; Институт озерадения РАН. – СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2002. – С. 211-224.
198. Курашов Е.А., Федорова Е.В., Крылова Ю.В. Использование метода QSAR для выявления наиболее перспективных аллелохемиков в отношении цианобактерий / Е.А. Курашов, Е.В. Федорова, Ю.В. Крылова // Российский журнал прикладной экологии. – 2018. – № 4(16). – С. 56-61.
199. Ладога / Ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев; Институт озерадения РАН. – СПб.: Общество с ограниченной ответственностью «Нестор-История», 2013. – 468 с. ISBN 978-5-4469-0085-5.
200. Ладожская трансгрессия и ландшафты второй половины голоцена в Южном Приладожье (по данным изучения археологического памятника Подолье-1) / Т.В. Сапелко, Т.М. Гусенцова, М.А. Кулькова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – № 5. – С. 78-95. DOI 10.31857/S2587-55662019578-95.
201. Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Н.А. Петрова, А.Ю. Тержевик, С.Е. Антонов [и др.]. – СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1992. – 328 с.
202. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Ред. В.А. Румянцев, В.Г. Дробкова; Институт озерадения РАН. – СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2002. – 327 с. ISBN 5-02-024949-1.
203. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: атлас. / Ред. В.А. Румянцев. – СПб.: ООО «Нестор-История», 2015. – 200 с. ISBN 978-5-4469-0741-0.
204. Ладожское озеро: атлас / Ред. В.А. Румянцев. – СПб.: 444 Военно-картографическая фабрика МО РФ, 2002. – 128 с.
205. Ладожское озеро: Развитие рельефа и условия формирования четвертичного покрова котловины / Ред. Г.С. Бискэ. – Петрозаводск: Карелия, 1978. – 205 с.
206. Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала / Ред. Г.В. Назаров. – Л.: Наука, 1978. – 247 с.
207. Лашкова Т.Б., Петрова Г.В., Жукова М.Ю., Митюков А.С. Влияние ультрадисперсионной гумато-сапропелевой суспензии на переваримость питательных веществ рациона / Т.Б. Лашкова, Г.В. Петрова, М.Ю. Жукова, А.С. Митюков // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 10. – С. 83-85. DOI 10.28983/asj.y2022i10pp83-85.
208. Левченко А.Б., Румянцев В.А. Левченко А.Б. Биосорбционные технологии в борьбе с нефтяными загрязнениями воды / А.Б. Левченко, В.А. Румянцев; Учреждение Российской академии наук, Ин-т озерадения РАН. – СПб.: Лема, 2010. – 197 с. ISBN 978-5-98709-391-7.
209. Лимнология и палеолимнология Монголии / Ред. Д.В. Севастьянов, В.Ф. Шувалов, И.Ю. Неуструева. – СПб.: Наука, 1994. – 304 с.
210. Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е.А. Курашов. – СПб.: ООО «Нестор-История», 2011. – 416 с. ISBN 978-5-98187-870-1.
211. Лудикова А.В. Диатомовые комплексы из седиментационных ловушек в Онежском озере / А.В. Лудикова // Биология внутренних вод. – 2023. – № 3. – С. 301-312. DOI 10.31857/S0320965223030142.
212. Лудикова А.В. Диатомовые комплексы поверхностного слоя донных отложений водоемов г. Санкт-Петербурга / А.В. Лудикова // Биология внутренних вод. – 2016. – № 3. – С. 64-72. DOI 10.7868/S032096521602011X.

213. Лудикова А.В. Диатомовые комплексы ранневалдайских отложений в котловине Ладожского озера / А.В. Лудикова // Вопросы современной альгологии. – 2019. – № 2(20). – С. 225-228. DOI 10.33624/2311-0147-2019-2(20)-225-228.
214. Лудикова А.В. Зависимость состава диатомовых комплексов водоемов мегаполиса от параметров водной среды (на примере г. Санкт-Петербурга) / А.В. Лудикова // Наука и образование. – 2015б. – № 1(77). – С. 93-99.
215. Лудикова А.В. История развития и современное состояние водоемов Карельского перешейка и г. Санкт-Петербурга по материалам диатомового анализа донных отложений: специальность 25.00.36 «Геоэкология (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Лудикова Анна Валерьевна. – Санкт-Петербург, 2008. – 25 с.
216. Лудикова А.В. От моря к озеру: биоиндикационные признаки изоляционных процессов / А.В. Лудикова // Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология: Материалы Всероссийской научной конференции. Сборник статей, пос. Приморский, Лоухский район, Республика Карелия, 14–22 сентября 2018 года. – пос. Приморский, Лоухский район, Республика Карелия: ООО «Издательский дом «КДУ», «Университетская книга», 2018. – С. 104-108.
217. Лудикова А.В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа / А.В. Лудикова // Известия Русского географического общества. – 2015а. – Т. 147, № 4. – С. 38-51.
218. Лудикова А.В. Факторы формирования состава диатомовых комплексов водоемов мегаполиса (на примере г. Санкт-Петербурга) / А.В. Лудикова // Вода: химия и экология. – 2014. – № 12(78). – С. 60-65.
219. Лудикова А.В., Греков И.М. Предварительные результаты диатомового анализа проб донных отложений оз. Антюх-Ламбина (ЮЗ Кольского полуострова) / А.В. Лудикова, И.М. Греков // География арктических регионов 2017 : Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2017 года / Ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, Н.В. Ловелиус. – СПб.: Типография ООО «Старый город», 2017. – С. 33-36.
220. Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. Изменения уровня Онежского озера в поздне-и послеледниковое время по данным изучения разреза озерно-болотных отложений острова Большого Клименецкого / А.В. Лудикова, Д.Д. Кузнецов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2018. – № 9. – С. 103-114. DOI 10.17076/lim880.
221. Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. Кремнистые микроводоросли в донных отложениях Ладожского озера и их роль в палеолимнологических реконструкциях / А.В. Лудикова, Д.Д. Кузнецов // Известия Русского географического общества. – 2021. – Т. 153, № 6. – С. 46-64. DOI 10.31857/S0869607121060033.
222. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее / М.И. Львович. – М.: Мысль, 1974. – 448 с.
223. Мерзлотно-гидрогеологические условия западной части Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) / Н.Э. Демидов, А.Л. Борисик, С.Р. Веркулич [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19, № 4. – С. 68-93. DOI 10.21455/GRV2020.4-6.
224. Методические аспекты лимнологического мониторинга / Ред. И.С. Трифонова; Институт озераведения Академии наук СССР. – Л.: «Наука», 1988. – 180 с. ISBN 5-02-026607-8.
225. Методические подходы к определению антропогенного влияния на накопление химических элементов в донных отложениях озер за индустриальный период / А.В. Терехов, Т.В. Сапелко, М.А. Гусева [и др.] // Вопросы естествознания. – 2018. – № 4(18). – С. 75-80.
226. Микроорганизмы донных осадков Еравнинских озер / М.Ц. Гармаев, Н.В. Ковалева, А.М. Гармаев [и др.] // Научное обеспечение развития АПК и сельских территорий Байкальского региона: Материалы научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки, Улан-Удэ, 05–09 февраля 2018 года. – Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2018. – С. 101-104.

227. Митрукова Г.Г. Компонентный состав и антибактериальная активность эфирных масел рдеста туполистного (*Potamogeton obtusifolius* Mert. et Koch) и роголистника тёмно-зелёного (*Ceratophyllum demersum* L.): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук: специальность 03.02.08 / Митрукова Галина Геннадьевна. – СПб.: Институт озерадения, 2015. – 22 с.
228. Митрукова Г.Г., Капустина Л.Л., Курашов Е.А. Экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований / Г.Г. Митрукова, Л.Л. Капустина, Е.А. Курашов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 9. – С. 88-100. DOI 10.17076/lim127.
229. Митюков А.С., Баракова Н.В., Рыбакин В.Н., Токбаева А.А. Влияние ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на биохимические показатели крови и продуктивность телок / А.С. Митюков, Н. В. Баракова, В.Н. Рыбакин, А.А. Токбаева // Общество. Среда. Развитие. – 2020. – № 4(57). – С. 52-56.
230. Митюков А.С., Гузева А.В., Нсенгумуремый Д. Влияние ультра-дисперсной гумато-сапропелевой суспензии на урожайность злаковых культур / А.С. Митюков, А.В. Гузева, Д. Нсенгумуремый // Foodlife 2018. Генетические ресурсы растений и здоровое питание: потенциал зерновых культур: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2018 года. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2018. – С. 37-38.
231. Митюков А.С., Иофина Н.В., Рыбакин В.Н. Влияние гуминового вещества на рост микроскопических грибов / А.С. Митюков, И.В. Иофина, В.Н. Рыбакин // Общество. Среда. Развитие. – 2020. – № 3(56). – С. 90-94.
232. Митюков А.С., Токбаева А.А., Баракова Н.В., Нсенгумуремый Д. Поиск новых решений в борьбе с микотоксинами / А.С. Митюков, А.А. Токбаева, Н.В. Баракова, Д. Нсенгумуремый // Генетика и разведение животных. – 2020. – № 2. – С. 63-69. DOI 10.31043/2410-2733-2020-2-63-69.
233. Митюков А.С., Ярошевич Г.С. Использование природных продуктов из сапропеля в животноводстве / А.С. Митюков, Г.С. Ярошевич // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – №4(53). –2018. – С. 138–144. DOI 10.24411/2078-1318-2018-14138.
234. Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования / Ред. И.С. Трифонова. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2008. – 246 с. ISBN 978-5-98709-127-2.
235. Многолетние изменения химико-биологических показателей состояния экосистемы мезотрофного озера Красного / И.С. Трифонова, Н.К. Воронцова, Е.С. Макарецца [и др.] // Экологическая химия. – 2002. – Т. 11, № 3. – С.168-179.
236. Многопрофильные натурные и лабораторные эксперименты по оценке работоспособности и экологической безопасности ультразвука при регуляции цветения цианобактерий / В.А. Румянцев, Ш.Р. Поздняков, В.Н. Рыбакин [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 46. – С. 118-133.
237. Моделирование процессов тепломассопереноса в водоеме и на его водосборе / Ред. К.Д. Крейман; РАН, Ин-т озерадения. – СПб.: Наука: С.-Петербург. отд-ние, 1992. – 121 с. ISBN 5-02-024638-7.
238. Моделирование сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании Ладожского озера. // Моделирование современного состояния экосистемы Ладожского озера (препринт). – СПб., [б.и.], 1998. – С. 29-53.
239. Моисеенко Т.И. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия / Т.И. Моисеенко. – М.: Наука, 2003. – 275 с.
240. Молчанов И.И. Ладожское озеро / И.В. Молчанов ; Под ред. д-ра техн. наук В.М. Родевича; НКО СССР, Гл. упр. гидрометеорол. службы СССР, Гос. ордена Трудового Красного знамени гидрол. ин-т. – М.; Л. : Гидрометеоиздат, 1945. – 557 с.
241. Назарова Л.Б., Сапелко Т.В., Кузнецов Д.Д., Сырых Л.С. Палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции голоцена по результатам хирономидного анализа донных отложений озера Глубокое / Л.Б. Назарова, Т.В. Сапелко, Д.Д. Кузнецов, Л.С. Сырых // Доклады Академии наук.–2015. – Т. 460, №6.– С. 736-739. DOI 10.7868/S0869565215060274.

242. Натурный эксперимент «Термический фронт-Ладога-2010» / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников [и др.] // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 444, № 1. – С. 83-87.
243. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические вариации температурного режима Ладожского озера для периода открытой воды / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый // Региональная экология. – 2010. – № 3(29). – С. 104-108.
244. Науменко М.А., Каретников С.Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Труды XII съезда русского географического общества, Кронштадт, 15–19 августа 2005 года. Том 6. – Кронштадт: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2005. – С. 82-86.
245. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели / М.А. Науменко // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2013. – № 1. – С. 62-72.
246. Науменко М.А. Горизонтальные градиенты температуры в термической фронтальной зоне крупного пресноводного озера / М.А. Науменко // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 6. – С. 89-92.
247. Науменко М.А. Гузиватый В.В., Сапелко Т.В. Цифровые морфометрические модели малых озер / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, Т.В. Сапелко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 34. – С. 26-32.
248. Науменко М.А. Многолетние тренды температуры воздуха / М.А. Науменко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021в. – С. 198-204.
249. Науменко М.А., Каретников С.Г. Климатические вариации ледового режима Ладожского озера / М.А. Науменко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 224-232.
250. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера / М.А. Науменко // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 345, № 4. – С. 514-517.
251. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Онежского озера / М.А. Науменко // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 370, № 3. – С. 393-396.
252. Науменко М.А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера / М.А. Науменко // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2021а. – Т. 14, № 2. – С. 78-88. DOI 10.7868/S2073667321020076.
253. Науменко М.А. Реакция димиктических озер на климатические изменения / М.А. Науменко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021б. – С. 194-198.
254. Науменко М.А. Цифровые батиметрические модели озер - необходимый инструмент для изучения лимнологических процессов / М.А. Науменко // Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии: лекции научных сотрудников, преподавателей и молодых ученых для вузов (по докладам Международной молодежной школы-конференции / Карельский научный центр Российской академии наук, Институт водных проблем Севера, Петрозаводский государственный университет, Отделение РГО в Республике Карелия. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 169-178.
255. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый // География и природные ресурсы. – 2022а. – Т. 43, № 1. – С. 83-92. DOI 10.15372/GIPR20220109.
256. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2022б. – Т. 58, № 1. – С. 52-62. DOI 10.31857/S0002351522010102.

257. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 408, № 5. – С. 675-678.
258. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Нестеров Н.А., Субетто Д.А. Морфометрические особенности подводного склона юго-западной части острова Валаам / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, Н.А. Нестеров, Д.А. Субетто // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 486, № 3. – С. 371-374. DOI 10.31857/S0869-56524863371-374.
259. Науменко М.А., Каретников С.Г. Климатические вариации ледового режима Ладожского озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – Москва: Российская академия наук, 2021. – С. 224-232.
260. Науменко М.А., Каретников С.Г. Особенности многолетних изменений температуры воздуха в северной части Ладожского озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 5. – С. 114-122.
261. Науменко М.А., Каретников С.Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 386, № 2. – С. 250-253.
262. Науменко М.А., Каретников С.Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 373, № 2. – С. 247-250.
263. Национальный атлас России: В 4-х томах / А.Д. Думнов, А.А. Кирсанов, Е.А. Киселева [и др.]. Том 2. – Москва: ПКО «Картография», 2007. – 496 с. ISBN 5-85120-250-5.
264. Неуструева И.Ю., Сапелко Т.В. Палеолимнологическое направление исследований / И.Ю. Неуструева, Т.В. Сапелко // 70 лет институту озероведения РАН / Институт озероведения РАН. – СПб.: Свое издательство, 2017. – С. 167-172.
265. Никаноров А.М. Гидрохимия: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Гидрология» / А.М. Никаноров. – 3-е изд., доп. – Ростов-на-Дону: НОК, 2008. – 462 с.
266. Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод / А.М. Никаноров // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – СПб.: Гидрометеоздат, 2005. – 576 с.
267. Никонов А.А. Восточно-Ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года / А.А. Никонов // Физика Земли. – 2005. – № 7. – С. 15-19.
268. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения северо-запада России / А.Л. Александровский, Х.А. Арсланов, Н.Н. Давыдова [и др.] // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 424, № 5. – С. 682-687.
269. Новые подходы комплексных палеолимнологических исследований голоценовой истории озер / Т.В. Сапелко, А.Н. Цыганов, Ю.А. Мазей [и др.] // Труды Палеонтологического общества, Санкт-Петербург, 03–07 апреля 2017 года. – СПб.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, 2018. – С. 118-123.
270. Нсенгумуремый Д., Баракова Н.В., Митюков А.С. Влияние ультрадисперсных гумато-сапропелевых суспензий на микробиологическую обсемененность ячменя и послеспиртовой барды / Д. Нсенгумуремый, Н.В. Баракова, А.С. Митюков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55. – С. 28-33. DOI 10.24411/2078-1318-2019-12028.
271. Озера Карельского перешейка: Лимнология и методика исследований: [Сборник статей] / Ред. И.И. Николаев, Е.А. Попова. – М.; Л.: Наука. [Ленингр. отделение], 1964. – 160 с.
272. Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР: [Сборник статей] / Ред. Л.Ф. Форш. Ч. 1; АН СССР. Геогр. о-во СССР. Ч. 2: Лимнологическая характеристика озер (гидрохимия, донные отложения, биология): [Сборник статей] / Ред. Н.И. Семенович. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1968. – 302 с.

273. Озеро Ильмень: Определение морфометрических характеристик на основе цифровой модели / М.А. Науменко, С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый [и др.] // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42, № 5. – С. 467. DOI 10.7868/S0321059615050120.
274. Озеро Кубенское: [В 3-х ч. Ч. 1: Гидрология; Ч. 2: Гидрохимия, донные отложения, растительные сообщества; Ч. 3: Зоология] / Ред. Т.И. Малинина, И.М. Распопов; АН СССР, Ин-т озероведения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1977. – Ч.1 – 306 с., Ч.2 – 220 с., Ч.3 – 220 с.
275. Оптимизация расположения водовыпусков очистных сооружений как способ оздоровления акватории Невской губы / Ф.В. Кармазинов, В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев [и др.] // Теория и практика восстановления внутренних водоемов: Научно-практическая конференция. Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 15–18 октября 2007 года. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2007. – С. 28-29.
276. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще / Ш.Р. Поздняков, С.Г. Каретников, Е.В. Иванова [и др.] // Российский журнал прикладной экологии. – 2021. – № 4(28). – С. 41-45. DOI 10.24852/2411-7374.2021.4.41.45.
277. Особенности геоморфологического строения дна Ладожского озера / В.М. Анохин, М.А. Науменко, Д.А. Субетто [и др.] // География: развитие науки и образования: Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 155-летию со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского, Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2018 года / Ред. В.П. Соломин, В.А. Румянцев, Д.А. Субетто, Н.В. Ловелиус. Том 1. – СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. – С. 442-447.
278. Особенности распространения тяжелой фракции в береговых отложениях Ладожского озера / В.М. Анохин, В.И. Томилин, Ф.И. Батанов [и др.] // География: развитие науки и образования: Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 155-летию со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского, Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2018 года / Ред. В.П. Соломин, В.А. Румянцев, Д.А. Субетто, Н.В. Ловелиус. Том 1. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. – С. 448-453.
279. Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера: (На прим. озер Большеземел. тундры) / Отв. ред. В.Г. Драбкова, И.С. Трифонова; РАН, Ин-т озероведения. – СПб.: Наука: Санкт-Петербург. изд. фирма, 1994. – 259 с.
280. Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка / Ред. И.Н. Андроникова, К.А. Мокиевский. – Л.: Наука: Ленингр. отделение, 1984. – 300 с.
281. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора / Ш.Р. Поздняков, С.А. Кондратьев, Е.А. Минакова [и др.] // География и природные ресурсы. – 2019. – № 3. – С. 67-76. DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(67-76).
282. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования / И.С. Зверев, К.В. Ушаков, Е.А. Шипунова [и др.] // Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения», Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 года. – Петрозаводск, 2017. – С. 228-233.
283. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) / В.А. Рябченко, В.А. Румянцев, В.Н. Коноплев [и др.] // Известия Русского географического общества. – 2006. – Т. 138, № 5. – С. 48-57.
284. Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / И.С. Трифонова, В.П. Беляков, А.Л. Афанасьева [и др.]. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2006. – 130 с. ISBN 5-98709-027-х.
285. Оценки возможных изменений климата и их воздействие на некоторые характеристики гидрологического режима Ладожского и Онежского озер / Н.Н. Филатов, Л.Е. Назарова, Ю.А. Сало, А.Ю. Тержевик // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований : Материалы юбилейной конференции, посвященной 15-летию ИВПС, Петрозаводск, 19–20 сентября 2006 года / Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем Севера, Карельское отделение Русского географического общества. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2006. – С. 178-196.

286. Павлова О.А. Сообщества фитопланктона озерно-речных систем Санкт-Петербурга / О.А. Павлова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2-2. – С. 462-466.
287. Павлова О.А. Структура фитопланктона малых озер в условиях урбанизированного ландшафта (на примере Суздальских озер г. Санкт-Петербурга): специальность 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Павлова Оксана Александровна. – Санкт-Петербург, 2004. – 24 с.
288. Павлова О.А., Игнатъева Н.В. Сообщества планктонных водорослей Суздальских озер (Санкт-Петербург) в условиях меняющейся биогенной нагрузки / О.А. Павлова, Н.В. Игнатъева // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием, Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 года. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 179-182.
289. Павлова, О.А. Фитопланктон / О.А. Павлова // Водные объекты Санкт-Петербурга / Ред. С.А. Кондратьев, Г.Т. Фруммин; Администрация Санкт-Петербурга, Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. – СПб.: Символ, 2002. – С. 131-135.
290. Палеолимнологическая комиссия Русского географического общества // Санкт-Петербургское городское отделение Русского географического общества: [сайт]. – URL: <https://www.rgo.ru/tu/spb/komissii/paleolimnologicheskaya-komissiya> (дата обращения: 15.05.2023).
291. Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор / Д.А. Субетто, Л.Б. Назарова, Л.А. Пестрякова [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24, № 4. – С. 369-380. DOI 10.15372/SEJ20170401.
292. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) / Т.В. Сапелко, Д.Д. Кузнецов, Н.Ю. Корнеевкова [и др.] // Известия Русского географического общества. – 2014. – Т. 146, № 3. – С. 29-40.
293. Палеолимнология озер Западного Крыма / Д.А. Субетто, Т.В. Сапелко, В.Ф. Столба [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 510, № 1. – С. 106-111. – DOI 10.31857/S2686739723600157.
294. Палеолимнология Онежского озера / АН СССР, Ин-т озераедения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1976. – 202 с.
295. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария / Г.Н. Панин, И.В. Соломонова, Т.Ю. Выручалкина // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36, № 6. – С. 743-756.
296. Патент № 2709308 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/50, А01Р 13/00. Альгицид для подавления развития цианобактерий и зеленых водорослей на основе метаболитов – аллелохимиков водных растений: № 2019104959 : заявл. 21.02.2019 : опубл. 17.12.2019 / Е.А. Курашов, Ю.В. Крылова, Ю.В. Батаева [и др.].
297. Первые находки вулканического пепла (12000 календарных лет) в озерных отложениях на Карельском перешейке, Северо-Запад России / Д.А. Субетто, С. Вастегорд, Т.В. Сапелко [и др.] // Известия Русского географического общества. – 2001. – Т. 133, № 3. – С. 69-76.
298. Перспективы использования низкомолекулярного метаболома водных макрофитов для индикации экологического состояния водных экосистем / Е.А. Курашов, Ю.В. Крылова, А.А. Егорова [и др.] // Вода: химия и экология. – 2018. – № 1-3(114). – С. 68-79.
299. Петухов С.И., Анохин В.М., Науменко М.А. Первый опыт морфотектонического моделирования района Ладожского озера / С.И. Петухов, В.М. Анохин, М.А. Науменко // География: развитие науки и образования: Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–25 апреля 2020 года / Ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. Том 1. – СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2020. – С. 147-151.
300. Подводная морфоструктура Валаамского архипелага в Ладожском озере: первые видеоизображения и количественные оценки / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, Д.С. Дудакова [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 507, № 1. – С. 126-131. DOI 10.31857/S268673972260117X.

301. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера / Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, Ш.Р. Поздняков [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 433-445. DOI 10.31857/S2587556621030043.
302. Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах / Ш.Р. Поздняков. – СПб.: Лема, 2012. – 227 с.
303. Поздняков Ш.Р., Измайлова А.В., Расулова А.М. Уникальные озера как объект научного интереса / Ш. Р. Поздняков, А.В. Измайлова, А.М. Расулова // Известия Русского географического общества. – 2020. – Т.152, № 3. – С. 17-31. DOI 10.31857/S0869607120030088.
304. Поздняков Ш.Р., Игнатъева Н.В. Концепция развития современной системы оценки экологического состояния водоемов / Ш.Р. Поздняков, Н.В. Игнатъева // Устойчивое развитие регионов: опыт, проблемы, перспективы: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Казань, 16–17 ноября 2017 года. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2017. – С. 331-336.
305. Полярные озера мира: общие сведения и состояние исследований / С.В. Рянжин, Д.А. Субетто, Н.В. Кочков, Н.А. Вейнмейстер // Ноосферизм: арктический взгляд на устойчивое развитие России и человечества в XXI веке : Материалы Первого Международного Ноосферного Северного Форума в форме коллективной монографии в 2-х книгах (Санкт-Петербург, 20-24 октября 2007 г.). Том Книга 2. – Санкт-Петербург-Кострома: Астерион: Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, 2007. – С. 125-140.
306. Полярные озера мира: современные данные и состояние исследований / С.В. Рянжин, Д.А. Субетто, Н.В. Кочков [и др.] // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37, № 4. – С. 387-397.
307. Прибрежно-водные экотоны больших озер: отчет о НИР / Институт озераведения РАН (ИНОЗ РАН); рук. И.М. Распопов. – СПб, 1998 – 98 с.
308. Приладожье. II. Параметры / М.В. Шитов, Г.С. Бискэ, И.В. Сумарева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2010. – № 3. – С. 18-28.
309. Применение высокоэффективной газожидкостной хроматографии для изучения органических соединений различной природы в воде Ладожского озера и других водоемов его бассейна / Н.Н. Коркишко, Ю.В. Крылова, Е.А. Курашов [и др.] // Экологическая химия. – 2001. – Т. 10, № 2. – С. 89-108.
310. Применение изотопных методов для изучения современных процессов водообмена Ладожского озера: отчет о НИР / ИНОЗ РАН; рук. В.А. Румянцев. – СПб., 2012. – 36 с.
311. Проблема регуляции токсигенного цветения пресноводных водоемов / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Рудский [и др.] // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 2. – С. 238-248. DOI 10.31857/S0321059622020134.
312. Пятов И.М., Анохин В.М. Использование методов кластерного анализа для изучения закономерностей распространения тяжелой фракции отложений береговой зоны Ладожского озера / И.М. Пятов, В.М. Анохин // География: развитие науки и образования : Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2021 года / РГПУ С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. Том 1. – СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2021. – С. 153-157.
313. Радиоактивные нуклиды как показатели времени водообмена Ладожского озера / А.В. Блинов, С.Г. Каретников, В.Е. Лазарев [и др.] // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 392, № 2. – С. 248-250.
314. Радиоуглеродное датирование в междисциплинарных археологических и палеолимнологических исследованиях на р. Россонь, Нарвско-Лужская низменность / Т. В. Сапелко, Д. В. Герасимов, А. Крийска [и др.] // Радиоуглерод в археологии и палеоэкологии: прошлое, настоящее, будущее : Материалы международной конференции, посвященной 80-летию старшего научного сотрудника ИИМК РАН, кандидата химических наук Ганны Ивановны Зайцевой, Санкт-Петербург, 23–25 ноября 2020 года / Под редакцией Н.Д. Буровой, А.А. Выборнова, М.А. Кульковой. – СПб: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт истории материальной культуры Российской академии наук, 2020. – С. 79-80. DOI 10.31600/978-5-91867-213-6-79-80.

315. Разработка природоподобной технологии для растениеводства на основе наноструктурированного сапропеля / В.А. Румянцев, А.С. Митюков, О.В. Шондина [и др.] // Общество. Среда. Развитие. – 2017. – № 1(42). – С. 93-97.
316. Разработка рекомендаций по рациональному местоположению выпусков очистных сооружений г. Ленинграда: отчет о НИР / Институт озераедения АН СССР. – Л., 1991. – 173с.
317. Растительные ресурсы Ладожского озера: [Сборник статей] / Ленингр. ордена Ленина гос. ун-т. Лаборатория озераедения. Т. 21. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1968. – 232 с.
318. Расулова А.М. Изменение суммарного испарения в природных зонах Арктики // Арктика: история и современность: сборник трудов Международной научной конференции, 20–21 октября 2022 года / СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 225-230. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i23-10
319. Расулова А.М. Моделирование процессов испарения Сайма-Вуоксинского водосбора / А.М. Расулова // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Сочи, 20–25 сентября 2021 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2021а. – С. 304-309.
320. Расулова А.М. Оценка динамики поверхностных водных объектов на водосборе Ладожского озера по данным Global Surface Water / А. М. Расулова // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83.- № 7. – С. 39-48. DOI 10.22389/0016-7126-2022-985-7-39-48.
321. Расулова А.М. Расчет эвапотранспирации на территории бассейна Ладожского озера / А.М. Расулова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021б. – № 9. – С. 146-156. DOI 10.17076/lim1445.
322. Расулова А.М., Измайлова А.В. Идентификация уникальных озер различного происхождения методами машинного обучения / А.М. Расулова, А.В. Измайлова // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Т. 8, № 12. – С. 180-194. DOI 10.33619/2414-2948/85/23.
323. Расулова А.М., Измайлова А.В. Методы поиска аномальных характеристик озерных экосистем на примере трансграничных водоемов / А.М. Расулова, А.В. Измайлова // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Сочи, 20–25 сентября 2021 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2021а. – С. 309-314.
324. Расулова А.М., Измайлова А.В. Применение алгоритма Isolation Forest для обоснования уникальности водоемов в группе карстовых озер / А.М. Расулова, А.В. Измайлова // Бюллетень науки и практики. – 2021б. – Т. 7, № 11. – С. 63-79. DOI 10.33619/2414-2948/72/08.
325. Региональные проблемы сбалансированного развития процесса природопользования: Эколого-экон. организац. и правовые аспекты / Рос. акад. наук, Ин-т проблем регион. экономики, М-во образования Российской Федерации, С.-Петерб. гос. техн. ун-т ; Под ред. д.г.н., проф., засл. деят. науки Рос. Федерации О.П. Литовки. – СПб. : СПбГТУ, 1999. – 507с.
326. Рекомендации по использованию радиолокационной информации об осадках в оперативном прогнозировании дождевых паводков / Гос. гидрол. ин-т. – Л.: ГГИ, 1987. –55 с.
327. Реконструкция относительного перемещения уровня моря в голоцене на Северо-Западе Онежского полуострова (губа Конюхова, Белое море) на основе палеолимнологических исследований / П.А. Леонтьев, Д.А. Субетто, Т.Ю. Репкина [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 933-945. DOI 10.31857/S2587556622060097.
328. Реконструкция палеоэкологических условий малых озер Карельского перешейка в связи с изменениями уровня балтийских палеобассейнов (по данным диатомового анализа) / А.Е. Шаталова, А.В. Лудикова, Д.А. Субетто [и др.] // Астраханский вестник экологического образования. – 2021. – № 6(66). – С. 18-30. DOI 10.36698/2304-5957-2021-6-18-30.
329. Реконструкция среды обитания человека на территории Карельского перешейка (по материалам исследования многослойного поселения Озерное 3) / Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова, М.А. Кулькова [и др.] // Хронология, периодизация и кросскультурные связи в каменном веке. Замятнинский сборник / Российская академия наук, Музей антропологии и этнографии им. Петра Великого (Кунсткамера) РАН; ответственный редактор: Г.А. Хлопачев. Вып. 1. – СПб: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2008. – С. 149-164.
330. Реконструкція палеогеографічних умов Західного Криму у пізньому голоцені за літологічними і палеонтологічними матеріалами вивчення озер / Субетто Д.О, Герасименко Н.П., Неуструева І.Ю. [та ін.] // Фізична географія та геоморфологія. – 2009. – № 56. – С. 299–310.

331. Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А., Лудикова А.В., Зарецкая Н.Е. Северо-западные берега Онежского полуострова Белого моря в голоцене: условия развития, динамика, хронология / Т.Ю. Репкина, Ф.А. Романенко, А.В. Лудикова, Н.Е. Зарецкая // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – Т. 84, № 6. – С. 888-904. DOI 10.31857/S2587556620060096.
332. Родионова Н.В. Изменения численности, биомассы и продукции зоопланктона / Н.В. Родионова // Методические аспекты лимнологического мониторинга / Институт озероведения Академии наук СССР. – Л.: Наука, 1988. – С. 85-93.
333. Рожнова Т.А. Почвенный покров Карельского перешейка / Т.А. Рожнова; Акад. наук СССР. Центр. музей почвоведения им. В.В. Докучаева М-ва сел. хозяйства СССР. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР. [Ленингр. отделение], 1963. – 184 с.
334. Роль метаболитов фитопланктона в формировании зон поверхностных неоднородностей воды в ладожском озере: значение для анализа данных дистанционного зондирования / Ю.В. Крылова, Н.Н. Коркишко, Е.А. Курашов, Е.В. Протопопова // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 2. – С. 56-61.
335. Россолимо Л.Л. Задачи и установки лимнологии как науки / Л.Л. Россолимо // Лимнологическая станция (Косино). Труды Лимнологической станции в Косине. – 1934. – Вып. 17. – С. 5-20.
336. Россолимо Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора / Л.Л. Россолимо. – М.: Наука, 1977. – 144 с.
337. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Рудский И.В., Коровин А.Н. Воздействие ультразвука малой интенсивности на состояние токсигенных цианобактерий / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Рудский, А.Н. Коровин // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 498, № 1. – С. 101-104. DOI 10.31857/S2686739721050145.
338. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Рудский И.В., Коровин А.Н. Воздействие ультразвука малой интенсивности на состояние токсигенных цианобактерий / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Рудский, А.Н. Коровин // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 498, № 1. – С. 101-104. DOI 10.31857/S2686739721050145.
339. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Токарев И.В. Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Токарев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 48. – С. 94-109.
340. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Математико-статистические основы совместного анализа временных гидрологических рядов / В.А. Румянцев, И.В. Бовыкин. – СПб.: Наука, 2009. – 86 с.
341. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Пространственно-временные закономерности колебаний стока рек Евразии / В.А. Румянцев, И.В. Бовыкин. – Л.: Наука, 1985. – 148 с.
342. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Большие озера Европы: ресурсный потенциал и экологические проблемы / В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова // Известия Русского географического общества. – 2011. – Т. 143, № 2. – С. 1-14.
343. 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. – Т. 84, № 1. – С. 52. DOI 10.7868/S0869587314010150.
344. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера азиатской части России / В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова. – СПб.: Свое издательство, 2017. – 480 с. ISBN 978-5-4386-1415-9.
345. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России / В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2015. – 392 с. ISBN 978-5-98709-964-3.
346. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира / В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова, А.В. Измайлова. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2012. – 370 с. ISBN 978-5-98709-536-2.
347. Румянцев В.А., Игнатьева Н.В. Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах / В.А. Румянцев, Н.В. Игнатьева. – СПб.: ВВМ, 2006. – 152 с.
348. Румянцев В.А., Измайлова А.В. Современное состояние и проблемы озёрного фонда азиатской части России / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 10. – С. 1033-1043. DOI 10.31857/S0869-587389101033-1043.

349. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Драбкова В.Г., Кондратьев С.А. Современное состояние и проблемы озёрного фонда европейской части России / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, В.Г. Драбкова, С.А. Кондратьев // Вестник Российской Академии Наук. – 2018. – Т. 88, № 6. – С. 539-550.
350. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Крюков Л.Н. Состояние водных ресурсов озёр Арктической зоны Российской Федерации / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, Л.Н. Крюков // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64, № 1(115). – С. 84-100. DOI 10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100.
351. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. Состояние озёрного фонда Арктической зоны Российской Федерации / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, А.С. Макаров // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91, № 2. – С.115-126. DOI 10.31857/S0869587321020079.
352. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Ульянова Т.Ю. Информационная система «Озера Земли» / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, Т.Ю. Ульянова // Известия Русского географического общества. – 2009. – Т. 141, № 3. – С. 8-14.
353. Румянцев В.А., Кондратьев С.А. Основные инновационные исследования Института озерадения РАН за период существования РАН – Петербургская академическая наука: альманах. Выпуск 1. К 30-летию Российской академии наук, 1991–2021 / Ред. В.А. Румянцев, М.И. Орлова. – СПб: Изд-во СПбГЭУ, 2022. – С. 218-239.
354. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Капотова Н.И., Ливанова Н.А. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек / В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев, Н.И. Капотова, Н.А. Ливанова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 93 с.
355. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Супрамолекулярные регуляторы цветения водоёмов / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 552-557.
356. Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Поздняков Ш.Р., Жуковский А.В. Цианобактериальное «цветение» воды – источник проблем природопользования и стимул инноваций в России / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков, Ш.Р. Поздняков, А.В. Жуковский // Общество. Среда. Развитие. – 2011. – № 2(19). – С. 222-228.
357. Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Рыбакин В.Н., Киселев Е.Ю. Проблема «цветения» сине-зелёных водорослей и пути её решения / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков, В.Н. Рыбакин, Е.Ю. Киселев // Перспективные направления развития науки в Петербурге. / Ред. Ж.И. Алферов, О.В. Белый, Г.В. Двас, Е.А. Иванова. – СПб.: ИП Пермяков С.А., 2015. – С. 277–294
358. Румянцев В.А., Митюков А.С., Крюков Л.Н., Ярошевич Г.С. Уникальность свойств гуминовых веществ сапропеля / В.А. Румянцев, А.С. Митюков, Л.Н. Крюков, Г.С. Ярошевич // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 473, № 6. – С. 1-4. DOI 10.7868/S0869565217120210.
359. Румянцев В.А., Разумов Е. В., Зилитинкевич С.С. Параметризованная модель сезонных изменений температуры и условий перемешивания в озере (С прил. к пробл. Севана) / АН СССР, Ин-т озерадения. – Препр. – Л. 1986. – 73 с.
360. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Результаты лабораторных и натурных исследований применения ультразвука малой мощности для регуляции цветения цианобактерий на водоемах / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН А.Н. Антипова, Иркутск, 23–27 сентября 2019 года. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 591-593.
361. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов / В.А. Румянцев, Ю.А. Трапезников. – СПб.: Наука, 2008. – 152 с.
362. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А., Григорьев А.С. Стохастические модели влияния климата на гидрологию озёр / В.А. Румянцев, Ю.А. Трапезников, А.С. Григорьев. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2001. – 156 с.
363. Русанов А.Г., Станиславская Е.В. Пространственная изменчивость видового и функционального состава водорослей перифитона в озерах Карельского перешейка / А.Г. Русанов, Е.В. Станиславская // Вопросы современной альгологии. – 2022. – № 2(29). – С. 38-45. DOI 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-38-45.

364. Рянжин С.В. Зональные закономерности элементов термического режима пресноводных озер северного полушария / С.В. Рянжин // Водные ресурсы. – 1991. – № 4. – С. 15-29.
365. Рянжин С.В. Много ли на Земле озер? // Природа. – 2005а. – № 4(1076). – С. 18-25.
366. Рянжин С.В. Новые оценки глобальной площади и объема воды естественных озер мира / С.В. Рянжин // Доклады Академии наук. – 2005б. – Т. 400, № 6. – С. 808-812.
367. Рянжин С.В., Ульянова Т.Ю. Геоинформационная система «Озера мира» – GIS WORLDLAKE / С.В. Рянжин, Т.Ю. Ульянова // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 370, № 4. – С. 542-545.
368. Сакевич А.И. Экзометаболиты пресноводных водорослей / А.И. Сакевич. – Киев: Наук. думка, 1985. – 200 с.
369. Сапелко Т.В. Динамика развития растительности в голоцене на территории Кенозерского Национального парка / Т.В. Сапелко // Известия Русского географического общества. – 2006, № 3. – С. 70-76.
370. Сапелко Т.В. Индикация изменений природной среды и уровня антропогенной нагрузки на озерные ландшафты по донным отложениям озер: новый методический подход / Т.В. Сапелко // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: Монография. В 5 томах / Под редакцией В.Г. Сычева, Л. Мюллера. Том II. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 420-424. DOI 10.25680/5728.2018.22.35.187.
371. Сапелко Т.В. Начало антропогенного воздействия и древняя история сельскохозяйственной деятельности на водосборе Ладожского озера / Т.В. Сапелко // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 90-93.
372. Сапелко Т.В., Анисимов М.А. Динамика береговой зоны Баренцева моря в голоцене на примере северо-западной части Кольского полуострова / Т.В. Сапелко, М.А. Анисимов // Система Баренцева моря. – М.: ООО «Издательство ГЕОС», 2021. – С. 44-51. DOI 10.29006/978-5-6045110-0-8/(6).
373. Сапелко Т.В., Анисимов М.А., Носевич Е.С. Палинологические реконструкции разрезов среднего и позднего голоцена побережья Баренцева моря / Т.В. Сапелко, М.А. Анисимов, Е.С. Носевич // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2016. – № 1(107). – С. 96-110.
374. Сапелко Т.В., Гусенцова Т.М., Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В. Палеолимнологические исследования в Подпорожском районе Ленинградской области / Т.В. Сапелко, Т.М. Гусенцова, Д.Д. Кузнецов, А.В. Лудикова // Тихвинская водная система. Коллективная монография / Ред. Е.М. Нестерова, В.А. Широковой. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. – С. 176-186.
375. 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 / Т.В. Сапелко, Н.В. Игнатьева, Д.Д. Кузнецов // Сохраним природное и культурное наследие Ладожского озера : Сборник научных трудов, по материалам Третьей Международной научно-практической конференции по проблемам охраны окружающей среды и сохранению культурного и природного наследия Ладожского озера «Ладожский парламент», Санкт-Петербург, 11–12 мая 2011 года / отв. ред. В.Ю. Цветков. – СПб.: ИПК «Прикладная экология», 2011. – С. 170-181.
376. Сапелко Т.В., Колпаков Е.М. След человека в истории Канозера / Т.В. Сапелко, Е.М. Колпаков // Природа. – 2010. – № 2(1134). – С. 73-78.
377. Сапелко Т.В., Колька В.В., Евзеров В.Я. Динамика природной среды и развития озер в позднем плейстоцене и голоцене на южном берегу Кольского полуострова (район пос. Умба) / Т.В. Сапелко, В.В. Колька, В.Я. Евзеров // Труды Карельского научного центра РАН. Серия – Лимнология. – 2015, №5. – С. 60 – 69.
378. Сапелко Т.В., Корнеенкова Н.Ю. Реконструкция истории островных озер по данным палинологического и ботанического анализов / Т.В. Сапелко, Н.Ю. Корнеенкова // Актуальные проблемы современной палинологии: Материалы XIV Всероссийской палинологической конференции, посвященной памяти Владимира Поликарповича Гричука, Москва, 05–08 июня 2017 года. – М.: Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2017. – С. 311-315.

379. Сапелко Т.В., Кузнецов Д.Д., Плотникова Е.В., Кулькова М.А. Изменение природных обстановок в голоцене на Онежско-Ладожском перешейке / Т.В. Сапелко, Д.Д. Кузнецов, Е.В. Плотникова, М.А. Кулькова // Известия Русского географического общества. – 2016. – Т. 148, № 2. – С. 35-44.
380. Сапелко Т.В., Севастьянов Д.В. К изучению истории развития ландшафтов Национального парка «Водлозерский» / Т.В. Сапелко, Д.В. Севастьянов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2001. – № 4. – С. 92-97.
381. Сапелко Т.В., Субетто Д.А. 60 лет палеолимнологии в России / Т.В. Сапелко, Д.А. Субетто // Известия Русского географического общества. – 2020. – Т. 152, № 1. – С. 76-80. DOI 10.31857/S086960712001005X.
382. Сапелко Т.В., Субетто Д.А., Севастьянов Д.В. Уровненный режим оз. Водлозеро: История развития / Т.В. Сапелко, Д.А. Субетто, Д.В. Севастьянов // Водлозерские чтения: Естественно-научные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: материалы Научно-практической конференции, посвященной 15-летию Национального парка «Водлозерский», Петрозаводск, 27–28 апреля 2006 года. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. – С. 37-44.
383. Сапелко Т.В., Терехов А.В., Амантов А.В. Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера / Т.В. Сапелко, А.В. Терехов, А.В. Амантов // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 75. – С. 23-34.
384. Сапелко Т.В., Терехов А.В., Субетто Д.А. Количественные и качественные оценки палеоклиматических изменений по результатам палинологического анализа и их роль в реконструкции развития озерных экосистем / Т.В. Сапелко, А.В. Терехов, Д.А. Субетто // Озера Евразии: проблемы и пути их решения : Материалы 1-й Международной конференции, Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 года / Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводский государственный университет; Ответственный редактор Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2017. – С. 616-622.
385. Сапелко Т.В. Особенности формирования растительного покрова в поздне-и послеледниковье на юге Карелии / Т.В. Сапелко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2002. – № 2. – С. 103-108.
386. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621549 Российская Федерация. Озера мира WORLDLAKE : № 2015620713 : заявл. 15.06.2015 : опублик. 13.10.2015 / Н.В. Кочков, С.В. Рянжин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераедения Российской академии наук (ИНОЗ РАН).
387. Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера / Л.П. Свириденко, А.П. Светов; Карельский научный центр Российской академии наук, Ин-т геологии. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. – 122 с. ISBN 978-5-327-40335-6.
388. Севастьянов Д.В. Особенности современной эволюции горных озер / Д.В. Севастьянов // Известия Всесоюзного географического общества. – 1983. – Т. 115, № 1. – С. 3-11.
389. Севастьянов Д.В., Сапелко Т.В., Науменко М.А., Бойнагрян В.Р. Ритмика природных процессов в районе массива Арагац (Армения) по данным изучения озера Умрой / Д.В. Севастьянов, Т.В. Сапелко, М.А. Науменко, В.Р. Бойнагрян // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2021. – № 1. – С. 16-26.
390. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера / Н.И. Семенович; Ленингр. ордена Ленина гос. ун-т. Лаборатории озераедения; Т.18. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1966. – 124 с.
391. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера / Н.И. Семенович. – М.; Л.: Наука, 1966. – 124 с.
392. Семенович Н.И. Лимнологические условия накопления железистых осадков в озерах / Н.И. Семенович; Академия наук СССР. Отделение геолого-географических наук. Труды Лаборатории озераедения; Т.6, Труды Лимнологической станции АН СССР на озере Пуннус-Ярви; Вып. 1. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. – 188 с.
393. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов /

- С.И. Сиделев, Т.Б. Голоколенова, Е.Н. Чернова, Я.В. Русских // Микробиология. – 2015. – Т. 84, № 6. – С. 732. DOI 10.7868/S0026365615060130.
394. Слинченков В.И., Константинов В.М., Николаев В.В. Новейшие разломы Ладожского озера, Кандалакшского залива и о. Имандра по сейсмоакустическим и акустическим данным / В.И. Слинченков, В.М. Константинов, В.В. Николаев // Вопросы картирования прибрежного мелководья Баренцева и Белого морей. – СПб: ГО «Севморгеология», 1997. – С. 22–41.
395. Случай возникновения гаффской болезни (алиментарно-токсической пароксизмальной миоглобинурии) в Республике Бурятия в селах Прибайкальского района, расположенных у озера Котокель / Е.Ю. Лудупова, Л.А. Сергеева, Н.С. Гыргешкинова [и др.] // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. – 2009. – № 3(67). – С. 92–94.
396. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / В.М. Анохин, М.А. Барбашова, С.Д. Голосов [и др.]. – М.: Российская академия наук, 2021. – 637 с. ISBN 978-5-907366-50-3.
397. Современное состояние и проблемы озёрного фонда европейской части России / В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, В.Г. Драбкова, С.А. Кондратьев // Вестник Российской академии наук. – 2018. – Т. 88, № 6. – С. 539–550. DOI 10.7868/S0869587318060075.
398. Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Ред. Н.А. Петрова, Г.Ф. Расплетина; АН СССР, Ин-т озероведения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1987. – 212 с.
399. Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений / О.Н. Галаганов, В.Л. Горшков, Т.В. Гусева [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 130–136.
400. Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы / И.С. Трифонова, В.П. Беляков, А.Л. Афанасьева [и др.]. – СПб.: ВВМ, НИИ СПбГУ, 2004. – 148 с. ISBN 5-9651-0093-0.
401. Сохранение природной экосистемы водоема в урбанизированном ландшафте / [Е.А. Стравинская, М.Ф. Веселова, Е.А. Юдин и др.]; Ред. Е.А. Стравинская. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1984. – 144 с.
402. Станиславская Е.В. Динамика водорослей перифитона в озерах различных геохимических ландшафтов / Е.В. Станиславская // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Материалы докладов III Международной научной конференции, Борок, 24–29 августа 2014 года – Ярославль: Филигрань, 2014. – С. 190–192.
403. Станиславская Е.В. Перифитон кислых озер Карельского / Е.В. Станиславская // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Материалы докладов IV Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 24–28 сентября 2018 года. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Реноме», 2018б. – С. 430–433.
404. Станиславская Е.В. Перифитон гумифицированных озер Карельского перешейка / Е.В. Станиславская // Ботаника в современном мире: Труды XIV Съезда Русского ботанического общества и конференции, Махачкала, 18–23 июня 2018 года / Русское ботаническое общество, Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Дагестанский научный центр РАН, Горный ботанический сад ДНЦ РАН, Дагестанский государственный университет. Том 3. – Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью «АЛЕФ», 2018а. – С. 65–68.
405. Станиславская Е.В. Разнообразие перифитонных сообществ в озерах Карельского перешейка / Е.В. Станиславская // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 35–48.
406. Станиславская Е.В., Афанасьева А.Л. Оценка экологического состояния озера Вачозеро (Ленинградская область) по структуре альгоценозов / Е.В. Станиславская, А.Л. Афанасьева // Региональная экология. – 2019. – № 2(56). – С. 30–42. DOI 10.30694/1026-5600-2019-2-30-42.
407. Стравинская Е.А., Трифонова И.С., Ульянова Д.С. Соотношение концентрации фосфора и хлорофилла в разнотипных озерах Карельского перешейка / Е.А. Стравинская, И.С. Трифонова, Д.С. Ульянова // Круговорот вещества и энергии в водоемах, Лиственичное на Байкале, 04–06 сентября 1985 года. Вып. 3: Структура, продуктивность и функционирование сообществ водных организмов. – Лиственичное на Байкале, 1985. – С. 139–140.

408. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции / Д.А. Субетто; Российская акад. наук, Институт озерадения [и др.]. – СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. – 343 с. ISBN 978-5-8064-1444-2.
409. Субетто Д.А., Сапелко Т.В., Столба В.Ф. Исследования палеолимнологов в Крыму / Д.А. Субетто, Т.В. Сапелко, В.Ф. Столба // Природа. – 2007. – № 12(1108). – С. 61-62.
410. Теоретические вопросы классификации озер / Отв. ред. Н.П. Смирнова. СПб.: Наука, 1993. 186 с.
411. Тепловой режим Ладожского озера // Ред. С.В. Калесник, Н.П. Смирнова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1968. – 243 с.
412. Терехов А.В., Сапелко Т.В. Картирование трансгрессивных стадий голоцена северо-западной части Ладожского озера / А.В. Терехов, Т.В. Сапелко // Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика), Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН; Отв. ред.: Субетто Д.А., Филатов Н.Н., Регеранд Т.И., Беличева Л.А. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2016.– Т. 1. – С. 178-184.
413. Термический режим озер Арктики / А.А. Шадрина, И.В. Федорова, С.Д. Голосов [и др.] // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей : труды VIII Международной научно-практической конференции: в 2 томах, Москва, 24–27 ноября 2014 года / Российский университет дружбы народов. Т. 1. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2014. – С. 581-589.
414. Тихомиров А.И. Термика крупных озер / А.И. Тихомиров. – Л.: Наука, 1982. – 232 с.
415. Трансформация природных метаболитов и проблема загрязнения Ладоги хлорорганическими ксенобиотиками / Ю.В. Крылова, Н.Н. Коркишко, Е.А. Курашов [и др.] // Государственный доклад. О состоянии окружающей среды в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 1998 году. – СПб., 2000. – С. 31-42.
416. Трифонова И.С. Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка / И.С. Трифонова. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979. – 168 с.
417. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона / Ред. И.Н. Николаев; АН СССР. Ин-т озерадения. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1990. – 182 с.
418. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л. Изменение состава и биомассы летнего фитопланктона при эвтрофировании озер Карельского перешейка / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева // Региональная экология. – 2017. – № 4(50). – С. 44-52.
419. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л. Мониторинг эвтрофирования озер Карельского перешейка по фитопланктону / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод : Материалы научной конференции с международным участием, Ростов-на-Дону, 08–10 сентября 2015 года / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт». Том Часть 2. – Ростов-на-Дону: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт», 2015. – С. 126-130.
420. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Макарецва Е.С., Бардинский Д.С. Соотношение фито- и зоопланктона в разнотипных озерах Карельского перешейка / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева, Е.С. Макарецва, Д.С. Бардинский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 515-519.
421. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Родионова Н.В. Сезонная динамика фито- и зоопланктона эвтрофирующегося озера в разные по водности и температурным условиям годы / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева, Н.В. Родионова // Региональная экология. – 2018. – № 3(53). – С. 29-38. DOI 10.30694/1026-5600-2018-3-29-38.
422. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Русанов А.Г. Трофическое состояние озер разных ландшафтов Карельского перешейка в современных условиях / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева, А.Г. Русанов // Вода: химия и экология. – 2016. – № 7(97). – С. 3-8.
423. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Русанов А.Г., Станиславская Е.В. Растительные сообщества озер центральной части Карельского перешейка как индикаторы их экологического состояния / И.С. Трифонова, А.Л. Афанасьева, А.Г. Русанов, Е.В. Станиславская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1-4. – С. 1034-1038.

424. Трифонова И.С., Давыдова Н.Н. Изучение поверхностного слоя донных отложений оз. Красного как метод выявления процессов эвтрофирования / И.С. Трифонова, Н.Н. Давыдова // Палеолимнологический подход к изучению антропогенного воздействия на озера. – Л.: ГО СССР, 1981. – С. 15-20.
425. Трифонова И.С., Макарецва Е.С. Сезонная и многолетняя динамика фито- и зоопланктона и их взаимоотношения в мезотрофном озере / И.С. Трифонова, Е.С. Макарецва // Биология внутренних вод. – 2006. – № 3. – С. 18-25.
426. Трифонова И.С., Павлова О.А. Структура и сукцессия фитопланктона урбанизированных водоемов Санкт-Петербурга / И.С. Трифонова, О.А. Павлов // Гидробиологический журнал. – 2005. – Т. 41, № 1. – С. 3-12.
427. Трифонова И.С., Павлова О.А., Афанасьева А.Л. Структура и продуктивность фитопланктона рек бассейна Ладоги как индикатор их состояния / И.С. Трифонова, О.А. Павлова, А.Л. Афанасьева // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2006. – С. 70-79.
428. Трифонова И.С., Павлова О.А., Афанасьева А.Л., Станиславская Е.В. Летний фитопланктон водохранилища Сестрорецкий Разлив по многолетним наблюдениям / И.С. Трифонова, О.А. Павлова, А.Л. Афанасьева, Е.В. Станиславская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 5-2. – С. 522-527.
429. Ульянец Е.К., Матрюков С.И., Червякова Н.В., Угрюмов А.И. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе / Е.К. Ульянец, С.И. Матрюков, Н.В. Червякова, А.И. Угрюмов // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 13. – С. 70-82.
430. Филатов Н.Н., Белецкий Д.В., Зайцев Л.В. Изменчивость гидрофизических полей Онежского озера: Эксперимент «Онего» / Н.Н. Филатов, Д.В. Белецкий, Л.В. Зайцев; Карел. науч. центр АН СССР, Отд. вод. пробл. – Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1990. – 111 с.
431. Филатов Н.Н., Черноок В.И., Зайцев Л.В. Эксперимент «Онего-89»: Препр. докл. / Н.Н. Филатов, В.И. Черноок, Л.В. Зайцев; ... Отд. вод. пробл. // Науч. доклады. АН СССР, Карел. фил. – Петрозаводск: КФ АН СССР, 1990. – 32 с.
432. Филенко Р.А. Гидрологические особенности Карельского перешейка / Р.А. Филенко // Ученые записки Ленинградского государственного университета им. А.А. Жданова. – 1960. – № 14(252). – С. 106-138.
433. Финский залив в условиях антропогенного воздействия / В.А. Авинский, Г.А. Алябина, Е.В. Балущкина [и др.]; Институт озероведения РАН, Северо-Балтийский морской фонд. – СПб.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озероведения Российской академии наук, 1999. – 367 с.
434. Формирование ливневых сбросов сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга / С.А. Кондратьев, В.А. Рябченко, В.Н. Коноплев [и др.] // Известия Русского географического общества. – 2006. – Т. 138, № 4. – С. 47-54.
435. Хлебович Т.В. Структурно-функциональная роль планктонных инфузорий в разнотипных озёрах южной Карелии / Т.В. Хлебович // Реакция озёрных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. – СПб.: Наука, 1997. – С. 62-71.
436. Хлебович Т.В. Участие планктонных инфузорий в трансформации взвешенного органического вещества в мезотрофном озере Костомоярви (Карелия) / Т.В. Хлебович // Гидробиологический журнал. – 2001. – Т. 35. – С. 38-45.
437. Хроно- и литостратиграфия озерных отложений острова Анзер (Соловецкие острова) в контексте послеледниковой истории Белого моря / Д.Д. Кузнецов, А.В. Лудикова, Д.А. Субетто [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 914-932. DOI 10.31857/S2587556622060085.
438. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления / Д.А. Субетто, В.П. Шевченко, А.В. Лудикова [и др.] // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 446, № 2. – С. 183-190.
439. Чудов С.В. Столбчатые базальты и конвекция Рэля-Бенара / С.В. Чудов // Природа. – 2017. – № 6(1222). – С. 34-40.

440. Шарова Н.Ю., Митюков А.С., Баракова Н.В., Нсенгумуремый Д. Антимикробное действие ультрадисперсных гумато-сапропелевых суспензий / Н.Ю. Шарова, А.С. Митюков, Н.В. Баракова, Д. Нсенгумуремый // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2019. – № 3. – С. 25-31. DOI 10.17586/2310-1164-2019-12-3-25-31.
441. Шитов М.В., Бискэ Ю.С., Сумарева И.В. Позднеголоценовое сейсмическое событие в юго-восточном Приладожье. II. Параметры / М.В. Шитов, Г.С. Бискэ, И.В. Сумарева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2010. – № 3. – С. 18-28.
442. Шмакова М.В. Математическое моделирование речных потоков / М. В. Шмакова; Ин-т озерадения Российской акад. наук. – СПб.: Лема, 2011. – 76 с. ISBN 978-5-98709-400-6.
443. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ / М.В. Шмакова. – СПб: Издательство ВВМ, 2018. – 149 с.
444. Шмакова М.В. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: специальность 11.00.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шмакова Марина Валентиновна. – Санкт-Петербург, 2000. – 25 с.
445. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков / М.В. Шмакова. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2013. – 142 с. ISBN 978-5-98709-677-2.
446. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 49. – С. 108-113.
447. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 9. – С. 74-84.
448. Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г. Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев, Е.Г. Маркова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 61-69.
449. Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение. Учебное пособие / С.М. Штин. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 373 с. ISBN 5-7418-0216-8.
450. Эвтрофирование мезотрофного озера: По материалам многолет. наблюдений на оз. Красном / Ред. И.Н. Анронилова. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1980. – 248 с.
451. Экологическое состояние водохранилища Сестрорецкий Разлив по результатам многолетних исследований / Ш.Р. Поздняков, И.С. Трифонова, Н.В. Игнатьева [и др.] // Региональная экология. – 2017. – № 4(50). – С. 5-19.
452. Экологическое состояние озерно-речной системы Вуоксы по гидрохимическим и гидробиологическим показателям / И.С. Трифонова, Г.Ф. Расплетина, В.П. Беляков [и др.] // Экологическая химия. – 2005. – Т. 14, № 4. – С.235-249.
453. Экология зарастающего озера и проблема его восстановления / Рос. акад. наук. Ин-т озерадения; Ред. В.Г. Драбкова, М.Я. Прыткова. – СПб.: Наука, 1999. – 221 с.
454. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI в / Е.А. Курашов, М.А. Барбашова, Д.С. Дудакова [и др.] // Биосфера. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 65-121. DOI 10.24855/BIOSFERA.V10I2.439.
455. Южный Урал. Озеро Увильды / В.И. Хомутова, М.А. Андреева, Н.Н. Давыдова [и др.] // История озер. История озер севера Азии. – СПб.: Наука, 1995. – С. 22-40.
456. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health / C. Campanale, C. Massarelli, I. Savino [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17, Is.4. – P. 1212. DOI: 10.3390/ijerph17041212.
457. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation / R. Leuning, Y.Q. Zhang, A. Rajaud, H. Cleugh et al. // Water Resources Research. – 2008. – Vol. 44. – W10419.

458. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments / R.L. Coppock, M. Cole, P.K. Lindeque [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 230. – P.829-837. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.017.
459. Allelopathic effects of the aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on phytoplankton species: contrasting effects between cyanobacteria and chlorophytes / C.A. Amorim, R.H. de Moura-Falcão, C.R. Valença [et al.] // *Acta Limnologica Brasiliensia*, – 2019. – Vol. 31. – P. e21. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X1419>
460. Allelopathic mechanism of pyrogallol to *Microcystis aeruginosa* PCC7806 (Cyanobacteria): From views of gene expression and antioxidant system / J. Shao, Z. Wu, G. Yu [et al.] // *Chemosphere*. – 2009. – Vol. 75, No. 7. – P. 924-928. DOI 10.1016/j.chemosphere.2009.01.021.
461. Alternative equilibria in shallow lakes / M. Scheffer, S.H. Hosper, M.L. Meijer [et al.] // *Trends in Ecology and Evolution*. – 1993. – Vol. 8. – P. 275-279.
462. An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes – Rus NIP II. / Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Swedish Environmental Protection Agency. 2015. – Report 6645. – 138 p.
463. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images / W.J. Emery, A.C. Thomas, M.J. Collins [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1986. – Vol. 91, No. 11. – P. 12865-12878.
464. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling / N.J. Hahladakis, A.V. Costas, R. Weber [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – Vol. 344. – P. 179-199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.
465. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment / A L. Andrady // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – Vol. 62, No. 8. – P. 1596-1605. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
466. Applied methodology for the PLC-6 assessment / Baltic Marine Environment Protection Commission. Ed. by Lars M. Svendsen, DCE Aarhus University, PLC-6 project manager. – Finland: HELCOM, 2019. – 59 p.
467. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes / R. Zdorovenov, G. Zdorovenova, S. Golosov [et al.] // *E3S Web of Conferences : 4th Vinogradov Conference “Hydrology: from Learning to Worldview” in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov, VC 2020, Saint-Petersburg, 20–27 марта 2020 года*. Vol. 163. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2020. – P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202016304008.
468. Argayash Lake, Cheliabinsk region, Russia / Subetto D., Pushenko M., Pisareva V. [et al.] // *Lake Status Records from the Former Soviet Union and Mongolia: Documentation of the Second Version of the Data Base*. – Boulder, Colorado, USA, 1996. – p. 95-97.
469. Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. – 2010. – Vol. 60, No.11. – P. 2050-2055. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014.
470. BaltHazAR II project, Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations / Appendix 3a Testing the nutrient load model for the River Luga catchment. – HELCOM, 2012. – 29 p.
471. Barbashova M. A., Malavin S. A., Kurashov E. A. First finding of Baikalian amphipod *Micrurus possolskii* Sowinsky, 1915 (Amphipoda, Crustacea) in Lake Ladoga / M.A. Barbashova, S.A. Malavin, E.A. Kurashov // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2013. – Vol. 4, No. 4. – P. 219-224. DOI 10.1134/S2075111713040036.
472. Barbashova M.A., Trifonova M.S., Kurashov E.A. Features of the Spatial Distribution of Invasive Amphipod Species in the Littoral of Lake Ladoga / M.A. Barbashova, M.S. Trifonova, E.A. Kurashov // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2021. – Vol. 12, No. 2. – P. 136-147. DOI 10.1134/S207511172102003X.
473. Bayona L.M., de Voogd N.J., Choi Y.H. Metabolomics on the study of marine organisms / L.M. Bayona, N.J. De Voogd, Y.H. Choi // *Metabolomics*. – 2022. – Vol. 18, No. 3. DOI 10.1007/s11306-022-01874-y.
474. Behrendt H., Dannowski R. (eds.) Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Weissensee Verlag, Berlin, Germany, 2005. 353 p.

475. Bennett E. Characteristics of the thermal regime of Lake Superior / E. Bennett // *J. of Great Lakes Res.* – 1978. – No 4. – P. 310-319.
476. Carlson R.T. A trophic state index for lakes / R.T. Carlson // *Limnology and Oceanography.* – 1977. – Vol. 2, No.22. – P.361-369.
477. Carpenter E.J., Smith K.L. Plastics on the Sargasso sea surface / E.J. Carpenter, K.L. Smith // *Science.* – 1972. – Vol. 175, Is. 4027. – P. 1240-1241. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240.
478. Chai Ts.T., Ooh K.F., Quah Y., Ch. F. Wong Edible freshwater macrophytes: a source of anticancer and antioxidative natural products—a mini-review / Ts.T. Chai, K.F. Ooh, Y. Quah, F. Ch. Wong // *Phytochemistry Reviews.* – 2015. – Vol. 14, No. 3. – P. 443-457. DOI 10.1007/s11101-015-9399-z.
479. Chemical composition and antibacterial properties of *achillea micrantha* / O. Astafyeva, L. Sukhenko, M. Egorov [et al.] // *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences.* – 2018. – Vol. 80, No. 3. – P. 434-441. DOI 10.4172/pharmaceutical-sciences.1000376.
480. Chironomid-Based Modern Summer Temperature Data Set and Inference Model for the Northwest European Part of Russia / L. Nazarova, L. Strykh, I. Grekov [et al.] // *Water.* – 2023. – Vol. 15, No. 5. – P. 976. <https://doi.org/10.3390/w15050976>
481. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes / W.E. Penning, M. Mjelde, B. Dudley [et al.] // *Aquatic Ecology.* – 2008. – Vol. 42. – P. 237-251.
482. Climate and environment on the Karelian Isthmus, Northwestern Russia, 13000-9000 cal. yrs BP / D.A. Subetto, N.N. Davydova, T.V. Sapelko [et al.] // *Boreas.* – 2002. – Vol. 31, No. 1. – P. 1-19. DOI 10.1111/j.1502-3885.2002.tb01051.x.
483. Climate Change During the Holocene (Past 12,000 Years) / I. Borzenkova, E. Zorita, O. Borisova, L.Kalnina [et al.] // *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies.* – Springer International Publishing, 2015. – P. 25-49. DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1_2
484. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes / S. Golosov, I. Zverev, A. Terzhevik [et al.] // *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* – 2012. – Vol. 64, No. 1. – P. 17264. DOI 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
485. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review / B. Wohlfarth, T. Lacourse, O. Bennike [et al.] // *Quaternary Science Reviews.* – 2007. – Vol. 26, No. 13-14. – P. 1871-1883. DOI 10.1016/j.quascirev.2007.04.005.
486. Coastal lakes of the Black Sea / S. Ryanzhin, N. Kochkov, N. Akhmetova, N. Weinmeister // *Journal of Environmental Protection and Ecology.* – 2011. – Vol. 12, No. 1. – P. 25-30. – EDN PFEDLB.
487. Cole M., Galloway T.S. Ingestion of Nanoplastics and Microplastics by Pacific Oyster Larvae / M. Cole, T.S. Galloway // *Environmental Science & Technology.* – 2015. – Vol. 49(24). – P. 14625-14632. DOI: 10.1021/acs.est.5b04099.
488. Colton J. B., Knapp F. D., Burns B. R. Plastic particles in surface water of the northwestern Atlantic / J. B. Colton, F. D. Knapp, B. R. Burns // *Science.* 1974. – Vol. 185 (4150). – P. 491-497. DOI: 10.1126/science.185.4150.491.
489. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate / N.A. Belkina, N.V. Kulik, N.A. Efremenko, M.S. Potakhin [et al.] // *Water.* – 2023. – Vol. 15, No. 6. – P. 1014. DOI: 10.3390/w15061014
490. Correlating paleolimnological results with radiocarbon dating of Lake Ladoga sediment sequences / T.V. Sapelko, D.D. Kuznetsov, A.V. Ludikova [et al.] // *Limnology and Freshwater Biology.* – 2022. – No. 4. – P. 1568-1570. DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1568.
491. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 / Y. Zhang, D. Kong, R. Gan, F.H.S. Chiew et al. // *Remote Sensing of Environment.* – 2019. – Vol. 222. – P. 165-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031>.
492. Current opinion: What is a nanoplastic? / J. Gigault, A. ter Halle, M. Baudrimont [et al.] // *Environmental Pollution.* – 2018. – Vol. 235. – P. 1030-1034. DOI:10.1016/j.envpol.2018.01.024.
493. Cytotoxicity evaluation of large cyanobacterial strain set using selected human and murine in vitro cell models / P. Hrouzek, A. Kapuścik, K. Voráčová [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety.* – 2016. – Vol. 124. – P. 177-185. DOI 10.1016/j.ecoenv.2015.10.020.
494. Davydova N.N., Subetto D.A., Khomutova V.I., Sapelko T.V. Late Pleistocene-Holocene paleolimnology of three northwestern Russian lakes / N.N. Davydova, D.A. Subetto, V.I. Khomutova, T.V. Sapelko // *Journal of Paleolimnology.* – 2001. – Vol. 26, No. 1. – P. 37-51. DOI 10.1023/A:1011131015322.

495. Defense Responses of the Marine-Derived Fungus *Aspergillus tubingensis* to Alkylphenols Stress / I. Kuzikova, N. Medvedeva, O. Rybalchenko [et al.] // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2020. – Vol. 231, No. 6. – P. 271. DOI 10.1007/s11270-020-04639-2.
496. Dembitsky V. M., Levitsky D. O., Glorizova T. A., Poroikov V. V. Acetylenic aquatic anticancer agents and related compounds / V. M. Dembitsky, D. O. Levitsky, T. A. Glorizova, V. V. Poroikov // *Natural Product Communications*. – 2006. – Vol. 1, No. 9. – P. 773-811. DOI 10.1177/1934578x0600100914.
497. Dembitsky V.M. Hydrobiological Aspects of Saturated, Methyl-Branched, and Cyclic Fatty Acids Derived from Aquatic Ecosystems: Origin, Distribution, and Biological Activity / V.M. Dembitsky // *Hydrobiology*. – 2022a. – Vol. 1, No. 1. – P. 89-110. <https://doi.org/10.3390/hydrobiology1010007>
498. Dembitsky V.M. Hydrobiological Aspects of Fatty Acids: Unique, Rare, and Unusual Fatty Acids Incorporated into Linear and Cyclic Lipopeptides and Their Biological Activity / V.M. Dembitsky // *Hydrobiology*. – 2022b. – Vol. 1, No. 3. – P. 331-432. <https://doi.org/10.3390/hydrobiology1030024>.
499. Development of models for the lake Ladoga ecosystem / L. Rukhovets, G. Astrakhantsev, V. Menshutkin [et al.] // *Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu*. – 2000. – No. 129. – P. 453-460.
500. Distribution of benthic testate amoeba assemblages along a water depth gradient in freshwater lakes of the Meshchera Lowlands, Russia, and utility of the microfossils for inferring past lake water level / A. N. Tsyganov, Y. A. Mazei, E. A. Malysheva [et al.] // *Journal of Paleolimnology*. – 2019. – Vol. 62, No. 2. – P. 137-150. DOI 10.1007/s10933-019-00080-6.
501. Doronzo B., Taddei S., Brandini C. Fattorini M. Extensive analysis of potentialities and limitations of a maximum cross-correlation technique for surface circulation by using realistic ocean model simulations / B. Doronzo, S. Taddei, C. Brandini, M. Fattorini // *Ocean Dynamics*. – 2015. – Vol. 65, No. 8. – P. 1183-1198. DOI 10.1007/s10236-015-0859-1.
502. Dudakova D.S., Dudakov M.O., Kurashov E.A., Anokhin V.M. Invasion of the Zebra Mussel *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) (Dreissenidae) in Lake Ladoga / D.S. Dudakova, M.O. Dudakov, E.A. Kurashov, V.M. Anokhin // *Biology Bulletin*. – 2021. – Vol. 48, No. 9. – P. 1452-1461. DOI 10.1134/S106235902109003X.
503. Ecometabolomics: Optimized NMR-based method / A. Rivas-Ubach, J. Sardans, A. Gargallo-Garriga [et al.] // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2013. – Vol. 4, No. 5. – P. 464-473. DOI 10.1111/2041-210X.12028.
504. Effects of Potassium and Sodium Bromides on *Triticum aestivum* and *Pisum sativum* / I. Shtangeeva, M. Niemelä, P. Perämäki [et al.] // *Russian Journal of Plant Physiology*. – 2022. – Vol. 69, No. 2. DOI 10.1134/S1021443722020182.
505. Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga / A.A. Andreev, R. Gromig, B. Wagner [et al.] // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48, No. 2. – P. 377-386. DOI 10.1111/bor.12382.
506. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach / M.L. Messenger, B. Lehner, G. Grill, I. Nedeva [et al.] // *Nature Communication*. – 2016. – Vol. 7 (1) – 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
507. Evolution of waterways and early human settlements in the Eastern Baltic area: Radiocarbon-based chronology / P.M. Dolukhanov, A.M. Shukurov, K.A. Arslanov [et al.] // *Radiocarbon*. – 2007. – Vol. 49, No. 2. – P. 527-542. DOI 10.1017/S0033822200042442.
508. Filazzola A., Blaggrave K., Imrit M.A., Sharma S. Climate Change Drives Increases in Extreme Events for Lake Ice in the Northern Hemisphere / A. Filazzola, K. Blaggrave, M.A. Imrit, S. Sharma // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – Vol. 47, No. 18. – P. e2020GL089608. DOI 10.1029/2020GL089608.
509. Fine-scale spatial variation in ice cover and surface temperature trends across the surface of the Laurentian Great Lakes / L.A. Mason, C.M. Riseng, S.D.P. Smith [et al.] // *Climatic Change*. – 2016. – Vol. 138, No. 1-2. – P. 71-83. DOI 10.1007/s10584-016-1721-2.
510. Fink P. Ecological functions of Vatile organic compounds in aquatic systems / P. Fink // *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*. – 2007. – Vol. 40, No. 3. – P. 155-168. <https://doi.org/10.1080/10236240701602218>.
511. First Multy-Proxy Studies of High-Mountain lakes in Armenia: Preliminary Results / T.V. Sapelko, V.R. Boynagryan, M.A. Naumenko [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2019. – Vol. 12, No. 4. – P. 272-284. DOI 10.24057/2071-9388-2019-87.

512. Fisher M.L., Allen R., Luo Y., Curtiss R. Export of Extracellular Polysaccharides Modulates Adherence of the Cyanobacterium *Synechocystis* / M.L. Fisher, R. Allen, Y. Luo, R. Curtiss // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8, No. 9. – P. e74514. DOI 10.1371/journal.pone.0074514.
513. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage / G. Kirillin, G. Nützmänn, J. Hochschild [et al.] // Environmental Modelling & Software. – 2011. – Vol. 26, No. 5. – P. 683-684. DOI 10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
514. Forel F. Handbuch der Seekunde. Allgemeine Limnologie / F. Forel. – Stuttgart, 1901. – 249s.
515. Forel F.A. Le Léman: Monographie Limnologique / F.A. Forel // Chemie, Thermique, Optique, Acoustique. Lausanne: F. Rouge, 1895. – T. 2. – 651 p.
516. Gazizova T.Yu., Sapelko T.V., Korneenkova N.Yu. The role of macrophytes in the study of north-eastern Ladoga small island lakes evolution during the Holocene / T.Yu. Gazizova, T.V. Sapelko, N.Yu. Korneenkova // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – No. 4. – P. 459-460. DOI 10.31951/2658-3518-2020-A-4-459.
517. George G., Hurley M., Hewitt D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake District / G. George, M. Hurley, D. Hewitt // Freshwater Biology. – 2007. – Vol. 52, No. 9. – P. 1647-1666. DOI:10.1111/j.1365-2427.2007.01773.x.
518. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment / Ed. P.J. Kershaw, // Rep. Stud. GESAMP. – 2015. – No. 90. – 96 p.
519. Global lake thermal regions shift under climate change / S.C. Maberly, I.D. Jones, S.J. Thackeray [et al.] // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 1232. DOI 10.1038/s41467-020-15108-z.
520. Golosov S.D., Zverev I., Terzhevik A. Thermal structure and heat exchange in ice-water column-sediment system / S.D. Golosov, I.S. Zverev, A. Yu. Terzhevik // Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters, Petrozavodsk, 02–05 июля 2003 года. – Petrozavodsk: Карельский научный центр РАН, 2003. – P. 83-88.
521. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments / S. Golosov, G. Kirillin // Environmental Modelling & Software. – 2010. – Vol. 25, No. 6. – P. 793-801. DOI 10.1016/j.envsoft.2010.01.002.
522. Golosov S., Kirillin G. Modelling the lake response to an external phosphorus load / S. Golosov, G. Kirillin // Proceedings of the Third International Lake Ladoga Symposium 1999. – Joensuu : Joensuun yliopisto, 2000. – 2000. – No.129. – P. 388-392.
523. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling / S. Golosov, A. Tolmachev, G. Kirillin, E. Shipunova // Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters, June 26-28 2006. – University of Granada, Spain (Ed.: Francisco J. Rueda Valdivia), 2006. – P. 209-215.
524. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling Thermal Structure and Heat Interaction between a Water Column and Bottom Sediments / S.D. Golosov, I.S. Zverev, A. Yu. Terzhevik // Lund Univ., Sweden, Report, 1998. – No. 3220. – 41p.
525. Golosov S.D., Ignatieva N.V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes / S.D. Golosov, N.V. Ignatieva // Hydrobiologia. – 1999. – Vol. 408-409. – P. 153-157. DOI 10.1007/978-94-017-2986-4_16.
526. Golosov S.D., Zverev I.S., Terzhevik A.Yu. Thermal structure and heat exchange in ice-water column-sediment system / S.D. Golosov, I.S. Zverev, A.Yu. Terzhevik // Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters, Petrozavodsk, July 02–05, 2003. – Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2003. – P. 83-88.
527. Google Earth Engine // Free access [Electronic resource]. URL: <https://code.earthengine.google.com> (accessed 05/15/2023).
528. Goullitquer S., Potin P., Tonon T. Mass spectrometry-based metabolomics to elucidate functions in marine organisms and ecosystems / S. Goullitquer, P. Potin, T. Tonon // Marine Drugs. – 2012. – Vol. 10, No. 4. – P. 849-880. DOI 10.3390/md10040849.
529. Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study / S. Gribin, V. Assaul, V. Andreev, S. Kondratyev // Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf., St.Petersburg. – 1994. – P.172-181.

530. Gross E.M., Hilt S., Lombardo P., Mulderij G. Searching for allelopathic effects of submerged macrophytes on phytoplankton—state of the art and open questions / E.M. Gross, S. Hilt Nee Körner, P. Lombardo, G. Mulderij // *Hydrobiologia*. – 2007. – Vol. 584, No. 1. – P. 77-88. DOI 10.1007/s10750-007-0591-z.
531. Guide to Microplastic Identification // Marine and Environmental Research Institute, 2015. – 13 p.
532. Guzeva A. Geochemical features of humic acids extracted from sediments of urban lakes of the Arctic // *Environ Monit Assess*, 2022 Sep 7. – 2022. – Vol. 194(10). – P.7 49. DOI 10.1007/s10661-022-10419-8.
533. Guzeva A.V., Krylova E.A., Fedorova I.V. Environmental aspects of molecular composition of humic acids isolated from lake sediments of a permafrost-affected area of the Arctic / A.V. Guzeva, E.A. Krylova, I.V. Fedorova // *Environ Monit Assess*. – 2021. – Vol. 42, No. 3. – P. 173-191. DOI 10.24425/ppr.2021.137142.
534. Guzeva A.V., Slukovskii Z., Dauvalter V., Denisov D. Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia / A. Guzeva, Z. Slukovskii, V. Dauvalter, D. Denisov // *Environ Monit Assess*. – 2021. – Vol. 193, No. 6. DOI 10.1007/s10661-021-09166-z.
535. Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Myazin V.A. Geochemical features of lakes located in an urbanised area of the Russian Arctic (Murmansk region) / A.V. Guzeva, Z.I. Slukovskii, V.A. Myazin // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – No. 4. – P. 511-512. DOI 10.31951/2658-3518-2020-A-4-511.
536. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change / M.C. Hansen, P.V. Potapov, S.A. Turubanova [et al.] // *Science*. – 2013. – Vol. 342, No. 6160. – P. 850-853. DOI 10.1126/science.1244693
537. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes / J.F. Pekel, A.Cottam, A.S. Belward, N. Gorelick // *Nature*. – 2016. – Vol. 540, No. 7633. – P. 418-422. DOI 10.1038/nature20584.
538. Holmes L.A., Turner A., Thompson R.C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment / L.A. Holmes, A. Turner, R.C. Thompson // *Environmental Pollution*. – 2012. – Vol. 160. – P. 42-48. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.08.052.
539. Holocene history of the lake and forest island ecosystem at and around Lake Seliger, Valdai Hills (East European Plain, Russia) / T. Sapelko, D. Kuznetsov, M. Naumenko [et al.] // *International Journal of Earth Sciences*. – 2022. DOI 10.1007/s00531-022-02210-4.
540. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes / S. S. Kostrova, H. Meyer, H. L. Bailey [et al.] // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48, No. 2. – P. 361-376. DOI 10.1111/bor.12385.
541. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements / P.M. Dolukhanov, D.A. Subetto, K.A. Arslanov [et al.] // *Quaternary International*. – 2010. – Vol. 220, No. 1-2. – P. 102-111. DOI 10.1016/j.quaint.2009.09.022.
542. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga / T. Sapelko, Sh. R. Pozdnyakov, D. Kuznetsov [et al.] // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 524. – P. 67-75. – DOI 10.1016/j.quaint.2019.05.028.
543. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga / T. Sapelko, Sh. R. Pozdnyakov, D. Kuznetsov [et al.] // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 524. – P. 67-75. – DOI 10.1016/j.quaint.2019.05.028.
544. Hu H., Hong Yu. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review / H. Hu, Yu. Hong // *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*. – 2008. – Vol. 2, No. 4. – P. 421-438. DOI 10.1007/s11783-008-0070-4.
545. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia / T. Alenius, D. Gerasimov, T. Sapelko, A. Ludikova [et al.] // *The Holocene*. – 2020. – Vol. 30, No. 11. – P. 1622-1636. DOI 10.1177/0959683620941071.
546. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO / D.V. Mironov, E. Heise, E. Kourzeneva [et al.] // *Boreal environ. Res.* – 2010. – Vol. 15. – P. 218–230.
547. Indicators of the effects of climate change on freshwater ecosystems / Rose K.C., Bierwagen B., Bridgham S.D. [et al.] // *Climatic Change*. – 2023. – Vol. 176, No. 3. – P. 23. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03457-1>

548. Invasive amphipods as a factor of transformation of Lake Ladoga ecosystems / E.A. Kurashov, M.A. Barbashova, D.V. Barkov [et al.] // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2012. – Vol. 3, No. 3. – P. 202-212. DOI 10.1134/S2075111712030058.
549. Invertebrate communities associated with macrophytes in Lake Ladoga: Effects of environmental factors / E.A. Kurashov, N.V. Usenko, M.A. Rychkova [et al.] // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 322, No. 1-3. – P. 49-55. DOI 10.1007/BF00031804.
550. Izmailova A.V. Rummyantsev V.A. Trophic status of the largest freshwater lakes in the world / A.V. Izmailova, V.A. Rummyantsev // *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. – 2016. – Vol. 21, No. 1. – P. 20-30. DOI 10.1111/lre.12123.
551. Izmailova A.V., Korneenkova N.Y. Lake Area Percentage in Russian Federation Territory and Its Governing Factors / A.V. Izmailova, N.Y. Korneenkova // *Water Resources*. – 2020. – Vol. 47, No. 1. – P. 13-21. DOI 10.1134/S009780782001008X.
552. Kaiser D., Kowalski N., Waniek J.J. Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics / D. Kaiser, N. Kowalski, J. J. Waniek // *Environmental Research Letters*. – 2017. – Vol. 12, No. 12. – P. 124003. DOI 10.1088/1748-9326/aa8e8b.
553. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years / S. Karetnikov, M. Naumenko // *Hydrological Processes*. – 2011. – Vol. 25, No. 18. – P. 2859-2867. DOI 10.1002/hyp.8048.
554. Kehr J.C., Dittmann E. Biosynthesis and function of extracellular glycans in cyanobacteria / J.C. Kehr, E. Dittmann // *Life*. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – P. 164-180. DOI 10.3390/life5010164.
555. Kirpenko N.I., Kurashov Y.A., Krylova Y.V. Component composition of exometabolites in cultures of some algae / N.I. Kirpenko, E.A. Kurashov, Y.V. Krylova // *Hydrobiological Journal*. – 2012. – Vol. 48, No. 3. – P. 59-70. DOI 10.1615/HydrobJ.v48.i3.60.
556. Koelmans A.A., Besseling E., Shim W.J. Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review / A.A. Koelmans, E. Besseling, W.J. Shim // *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, 2015. – P. 325–340. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_12.
557. Kondratyev S.A., Golosov S.D. “Watershed – Lake” System Modelling / S.A. Kondratyev, S.D. Golosov // NATO ARW “Stochastic Models of Hydrological Processes and Their Applications to Problems of Env. Preservation”, Moscow, Russia, 1998. – P. 396-400.
558. Kondratyev S.A., Golosov S.D. Catchment-lake system modeling: problems and solutions / S.A. Kondratyev, S.D. Golosov // *New Trends in Hydrology*; Ed. R. Gaudio (CNR-GNDICI Publ. No.2823), Editoriale Bios, Italy, 2004. – P. 161-168.
559. Krylova J., Kurashov E. Potential applications of the low-molecular-weight metabolome of *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, 1892 (Cyanophyceae: Merismopediaceae) / J. Krylova, E. Kurashov // *Algae Biotechnology: Integrated Algal Engineering for Bioenergy, Bioremediation, and Biomedical Applications*. Eds.: Ashfaq Ahmad, Fawzi Banat, Hanifa Taher. Elsevier, 2022. – P. 347-376. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90476-6.00021-2>.
560. Krylova J.V., Kurashov E.A., Korkishko N.N. The pollution of Lake Ladoga by organochlorine pesticides and petroleum products / J.V. Krylova, E.A. Kurashov, N.N. Korkishko // *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. – 2003. – Vol. 8, No. 3-4. – P. 231-246. DOI 10.1111/j.1440-1770.2003.00225.x.
561. Kurashov E.A., Trifonova M.S., Barbashova M.A. Expansion Dynamics of *Micrurus possolskii* Sowinsky, 1915 (Amphipoda, Crustacea) in Lake Ladoga / E.A. Kurashov, M.S. Trifonova, M.A. Barbashova // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 326-331. DOI 10.1134/S2075111720040050.
562. Kurashov E., Kapustina L., Krylova J., Mitrukova G. The Use of Fluorescence Microscopy to Assess the Suppression of the Development of Cyanobacteria under the Influence of Allelochemicals of Aquatic Macrophytes [Internet]. / E. Kurashov, L. Kapustina, J. Krylova, G. Mitrukova // *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms* / eds. N.Grigoryeva. – London: IntechOpen, 2020. – Ch. 4. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92800>.
563. Kurashov E.A., Fedorova E.V., Krylova J.V., Mitrukova G.G. Assessment of the Potential Biological Activity of Low Molecular Weight Metabolites of Freshwater Macrophytes with QSAR / E.A. Kurashov, E.V. Fedorova, J.V. Krylova, G.G. Mitrukova // *Scientifica*. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1205680. DOI 10.1155/2016/1205680.

564. Kurashov E.A., Krylova J.V., Protopopova E.V. The Use of Allelochemicals of Aquatic Macrophytes to Suppress the Development of Cyanobacterial “Blooms” / E.A. Kurashov, J.V. Krylova, E.V. Protopopova [Internet] // *Plankton Communities* / eds. L. Pereira, A.M. Gonçalves. – London: IntechOpen, 2021. – Ch. 5. ISBN 978-1-83968-609-2. [https://doi.org/ 10.5772/intechopen.95609](https://doi.org/10.5772/intechopen.95609).
565. Kurashov E.A., Krylova J.V., Rusanov A.G. Change of Low-Molecular-Weight Metabolome of Alien Species *Potamogeton pectinatus* L. in Lake Ladoga in Comparison with Population of Native Range / E.A. Kurashov, J.V. Krylova, A.G. Rusanov // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2020. – Vol. 11, No. 3. – P. 246-264. DOI 10.1134/S2075111720030066.
566. Kurashov E.A., Mitrukova G.G., Krylova Yu.V. Interannual Variability of Low-Molecular Metabolite Composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a Floodplain Lake with a Changeable Trophic Status / E.A. Kurashov, G.G. Mitrukova, J.V. Krylova // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2018. – Vol. 11, No. 2. – P. 179-194. DOI 10.1134/S1995425518020063.
567. Ladoga and Onego – Great European Lakes / G.P. Astrakhantsev, N.N. Filatov, A.V. Litvinenko [et al.]. – Chester : Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2010. – 302 p. ISBN 978-3-540-68144-1.
568. Lake sediments of the Kindo Peninsula and its surroundings (Karelian Coast of the White Sea) – Holocene stratigraphy and dynamics of organic accumulation / D.D. Kuznetsov, A.V. Ludikova, D.A. Subetto [et al.] // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – No. 4. – P. 1456-1458. DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1456.
569. Lakes as sentinels of climate change / R. Adrian, C.M. O'reilly, H. Zagarese [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 2009. – Vol. 54, No. 6 Part 2. – P. 2283-2297. DOI 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
570. Littoral zone of Lake Ladoga: Ecological state evaluation / I.M. Raspopov, I.N. Andronikova, O.N. Dotsenko [et al.] // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 322, No. 1-3. – P. 39-47. DOI 10.1007/BF00031803.
571. Livingstone D.M. Impact of Secular Climate Change on the Thermal Structure of a Large Temperate Central European Lake / D.M. Livingstone // *Climatic Change*. – 2003. – Vol. 57, No. 1-2. – P. 205-225.
572. Loss of Ice Cover, Shifting Phenology, and More Extreme Events in Northern Hemisphere Lakes / S. Sharma, M.A. Imrit, K. Blagrove [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2021. – Vol. 126, No. 10. – P. e2021JG006348. DOI 10.1029/2021JG006348.
573. Lost at sea: where is all the plastic? / R.C. Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell [et al.] // *Science*. – 2004. – Vol. 304, Is. 5672. – P. 838. DOI: 10.1126/science.1094559.
574. Low-molecular weight metabolites in *Spirodela polyrhiza* (L.) Scheiden from Northwest Russia in the middle of the growing season / E.A. Kurashov, J.V. Krylova, G.G. Mitrukova [et al.] // *Ponte*. – 2016. – Vol. 72, No. 10. – P. 10-22. DOI 10.21506/j.ponte.2016.10.2.
575. Ludikova A.V. Long-Term Studies Of Surface-Sediment Diatom Assemblages In Assessing The Ecological State Of Lake Ladoga, The Largest European Lake / A.V. Ludikova // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2021. – Vol. 14, No. 1. – P. 251-262. DOI 10.24057/2071-9388-2020-174.
576. Ludikova A.V. Siliceous microalgae in the Holocene sediments of Lake Ladoga / A.V. Ludikova // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – No. 4. – P. 453-454. DOI 10.31951/2658-3518-2020-A-4-453.
577. Ludikova A.V., Sapelko T.V., Kuznetsov D.D. On the marine limit at the Kandalaksha Coast, the White Sea: new data from Lake Kanozero, a huge isolation basin in the middle course of the River Umba / A.V. Ludikova, T.V. Sapelko, D.D. Kuznetsov // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – No. 4. – P. 1473-1475. DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1473.
578. Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions / A.V. Ludikova, D.D. Kuznetsov, T.V. Sapelko, D.A. Subetto // *Quaternary International*. – 2023. – Vol. 605-606. – P. 61-78.
579. Macías F.A., Galindo J.L.G., García-Díaz M.D., Galindo Ju.C.G. Allelopathic agents from aquatic ecosystems: potential biopesticides models / F.A. Macías, J.L.G. Galindo, M.D. García-Díaz, Ju.C.G. Galindo // *Phytochemistry Reviews*. – 2008. – Vol. 7, No. 1. – P. 155-178. DOI 10.1007/s11101-007-9065-1.

580. Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jönsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data / J. Malm, D. Mironov, A. Terzhevik, L. Jönsson // *Limnology and Oceanography*. – 1994. – Vol. 39, No. 6. – P. 1333-1348.
581. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48 / J. Masura, J. Baker, G. Foster, C. Arthur // NOAA Marine Debris Program, 2015. – 31 p.
582. Meybeck M. Global distribution of lakes / Eds. A. Lerman, D. Imboden, J. Gat. Berlin // *Physics and Chemistry of Lakes* / Springer, Berlin, Heidelberg, 1995. – P. 1–36.
583. Mimicking *Daphnia magna* bioassay performance by an electronic tongue for urban water quality control / D. Kirsanov, A. Legin, E. Legin [et al.] // *Analytica Chimica Acta*. – 2014. – Vol. 824. – P. 64-70. DOI 10.1016/j.aca.2014.03.021.
584. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction / D. Mironov // *Technical Report Series – World Health Organization, Geneva*. – 2008. – T. 11. – 47 p.
585. Modeling Air-Lake Interaction. Physical Background / E.E. Fedorovich, S.D. Golosov, K.D. Kreiman [et al.]. – Berlin : Springer-Verlag Berlin, 1991. – 140 p. – (Research Reports in Physics). ISBN 3-540-52988-8.
586. Mohamed Z.A. Macrophytes-cyanobacteria allelopathic interactions and their implications for water resources management – A review / Z.A. Mohamed // *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters*. – 2017. – Vol. 63. – P. 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.02.006>
587. Moll R.A., Bratkovich A., Chang W., Pu P. Physical, chemical and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan Vernal Thermal Front / R.A. Moll, A. Bratkovich, W. Chang, P. Pu // *Estuaries*. – 1993. – Vol. 16, No. 1. – P. 92–103.
588. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change / B.M. Kraemer, P.B. McIntyre, O. Anneville [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42, No. 12. – P. 4981-4988. DOI 10.1002/2015GL064097.
589. Mulderij G, Mau B, Van Donk E, Gross EM. Allelopathic activity of *Stratiotes aloides* on phytoplankton – towards identification of allelopathic substances / G. Mulderij, B. Mau, E. Van Donk, E.M. Gross // *Hydrobiologia*. – 2007. – Vol. 584, No. 1. – P. 89-100. DOI 10.1007/s10750-007-0602-0.
590. Nace R.L World water inventory and control / Ed. R.J. Chorley // *Water, Earth and Man*. – London: Methuen, 1969. – C. 31-42.
591. NASA Ocean Color // Free access [Electronic resource]. – URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (accessed 05/15/2023).
592. Naumenko M.A. Lake Ladoga digital bathymetric models: Development approaches and insight for limnological investigations / M.A. Naumenko // *Limnological Review*. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – P. 65-80. DOI 10.2478/limre-2020-0008.
593. Naumenko M.A. Seasonality and trends in the Secchi disk transparency of Lake Ladoga / M.A. Naumenko // *Hydrobiologia*. – 2008. – Vol. 599, No. 1. – P. 59-65. DOI 10.1007/s10750-007-9198-7.
594. Nonpollen palynomorphs: Indicators of salinity and environmental change in the Caspian-Black Sea-Mediterranean corridor / P.J. Mudie, S.A.G. Leroy, F. Marret [et al.] // *Special Paper of the Geological Society of America*. – 2011. – Vol. 473. – P. 89-115. DOI 10.1130/2011.2473(07).
595. Northern European Lake Survey, 1995: Finland, Norway, Sweden, Denmark, Russian Kola, Russian Karelia, Scotland and Wales / A. Henriksen, B.L. Skjelvåle, E. Fjeld [et al.] // *Ambio*. – 1998. – Vol. 27, No. 2. – P. 80-91.
596. Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes / Ed. H. Behrendt, R. Dannowski. – Weissensee Verlag, Berlin, Germany, 2005. – 353 p. ISBN 978-3-510-65297-6
597. OECD. Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control / Ed. R.A. Vollenweider. – OECD, Paris, 1982. – 154 p.
598. Panov V.E. Establishment of the Baikalian endemic amphipod *Gmelinoides fasciatus* Stebb. in Lake Ladoga / V.E. Panov // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 322, No. 1-3. – P. 187-192. DOI 10.1007/BF00031826.

599. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes / S.D. Golosov, E.A. Shipunova, O.A. Maher [et al.] // *Physical Processes In Natural Waters : 9th Workshop on Physical Processes In Natural Waters*, Lancaster, 04–06 september 2005. – Lancaster: Lancaster University, 2005. – P. 229-237.
600. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes / S. Golosov, E. Schipunova, O. A. Maher [et al.] // *Oecologia*. – 2007. – Vol. 151, No. 2. – P. 331-340. DOI 10.1007/s00442-006-0543-8.
601. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperatures in lakes / S. Piccolroaz, M. Toffolon, B. Majone // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2013. – Vol. 17. – P. 3323-3338. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3323-2013>.
602. Plastics and the microbiome: impacts and solutions / G. Lear, J.M. Kingsbury, S. Franchini [et al.] // *Environmental Microbiome*. – 2021. – Vol. 16. – 2. DOI: 10.1186/s40793-020-00371-w.
603. Pomfret S.M., Brua R.B., Izral N.M., Yates A.G. Metabolomics for biomonitoring: An evaluation of the metabolome as an indicator of aquatic ecosystem health / S.M. Pomfret, R.B. Brua, N.M. Izral, A.G. Yates // *Environmental Reviews*. – 2020. – Vol. 28, No 1. – <https://doi.org/10.1139/er-2019-0003>.
604. Potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) and pea (*Pisum sativum*) for remediation of soils contaminated with bromides and PAHs / I. Shtangeeva, P. Perämäki, M. Niemelä [et al.] // *International Journal of Phytoremediation*. – 2018. – Vol. 20, No. 6. – P. 560-566. DOI 10.1080/15226514.2017.1405375.
605. Potential Use of Aquatic Vascular Plants to Control Cyanobacterial Blooms: A Review / I. Nezbyriska, O. Usenko, I. Konovets [et al.] // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – P. 1727. <https://doi.org/10.3390/w14111727>
606. Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga / E. Lebas, S. Krastel, C. Görtz [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2021. – Vol. 251. – P. 106637. DOI 10.1016/j.quascirev.2020.106637.
607. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe / C.M. O'reilly, R.J. Rowley, S. Sharma [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42, No. 24. – P. 10773-10781. DOI 10.1002/2015GL066235.
608. Rodgers G. Time of Onset of Full Thermal Stratification in Lake Ontario in Relation to Lake Temperatures in Winter / G. Rodgers // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 1987. – Vol. 44. – P.2225-2229.
609. Rodgers G.K. A Note on thermocline development and the thermal bar in Lake Ontario / G.K. Rodgers // *Symposium of Garda, Int. Assoc. Scientific Hydrology*. – 1966. – No. 1(70). – P. 401-405.
610. Rojo C., Segura M., Rodrigo M.A. The allelopathic capacity of submerged macrophytes shapes the microalgal assemblages from a recently restored coastal wetland / C. Rojo, M. Segura, M.A. Rodrigo // *Ecological Engineering*. – 2013. – Vol. 58. – P. 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.019>.
611. Rusanov A., Trifonova I., Ignatyeva N., Pavlova O. Long-term changes in phytoplankton and macrophyte communities in eutrophic shallow reservoir and prospects for its restoration / A. Rusanov, I. Trifonova, N. Ignatyeva, O. Pavlova // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. – 2020. – Vol. 49, No. 2. – P. 168-183. DOI 10.1515/ohs-2020-0016.
612. Ryzanin S.V. Global statistics for surface area and volume of natural world lakes / S.V. Ryzanin // *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*. – 2005. – Vol. 29, No. 2. – P. 640-644.
613. Sapelko T.V. Holocene natural and man-made environmental change as recorded in lake sediments of NW Russia / T.V. Sapelko // *Quaternary International*. – 2012. – Vol. 279-280. – P. 346-461, P.427.
614. Sapelko T.V. Northern Scandinavia: Paleogeography of the Kola Peninsula / T.V. Sapelko // *Human Colonization of the Arctic: The Interaction Between Early Migration and the Paleoenvironment*. – London: Academic Press, 2017. – P. 23-31. DOI 10.1016/B978-0-12-813532-7.00003-6.
615. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures / L.A. Winslow, J.S. Read, G.J.A. Hansen [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 2017. – Vol. 62 (5). – P. 2168-2178. <https://doi.org/10.1002/lno.10557>.

616. Shmakova M.V. Sediment Transport in River Flows: New Approaches and Formulas : FROM THE EDITED VOLUME Sediment Transport [Working Title] Dr. Davide Pasquali / M.V. Shmakova. – London : IntechOpen, 2022. DOI 10.5772/intechopen.103942.
617. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes / A. Terzhevik, S. Golosov, A. Mitrokhov [et al.] // Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters, 3-6 September, 2007. – Warnemunde, Germany, 2007. – P. 147-156
618. Sorokin A., Naumenko M., Veselova M. New morphometrical data of Lake Ladoga / A.I. Sorokin, M.A. Naumenko, M.F. Veselova // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 322, No. 1-3. – P. 65-67. DOI 10.1007/BF00031806.
619. Stolba V.F., Subetto D.A., Sapelko T.V. Paleolimnological investigations in Lake Dzarylgach / V.F. Stolba, D.A. Subetto, T.V. Sapelko // The Dzarylgach survey project. – Arhus, Denmark: Arhus University, 2012. – Vol. I. – P.49-50.
620. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? / L. C. De Sá, M.N. Futter, M. Oliveira [et al.] // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 645. – P. 1029-1039. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.07.207.
621. Studying the Concentration of Microplastic Particles in Water, Bottom Sediments and Subsoils in the Coastal Area of the Neva Bay, the Gulf of Finland / Sh. R. Pozdnyakov, E.V. Ivanova, A.V. Guzeva [et al.] // Water Resources. – 2020. – Vol. 47, No. 4. – P. 599-607. DOI 10.1134/S0097807820040132.
622. Tamrazyan G.P. Total lake water resources of the planet / G.P. Tamrazyan // Bulletin of The Geological Society of Finland. – 1974. – Vol. 46, No. 1. – P. 23-27.
623. Tekile A., Kim I., Lee J.-Y. 2200 kHz Sonication of Mixed-Algae Suspension from a Eutrophic Lake: The Effect on the Caution vs. Outbreak Bloom Alert Levels / A. Tekile, I. Kim, J.-Y. Lee // Water. – 2017. – Vol. 9, No 12. – P. 915.
624. Ter Braak C.J.F., Verdonschot P.F.M. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology / C.J.F. Ter Braak, P.F.M. Verdonschot // Aquatic Sciences. Research Across Boundaries. – 1995. – Vol. 57, No. 3. – P. 255-289. DOI 10.1007/bf00877430.
625. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia / P. M. Dolukhanov, D. A. Subetto, Kh. A. Arslanov [et al.] // Quaternary International. – 2009. – Vol. 203, No. 1-2. – P. 33-51. DOI 10.1016/j.quaint.2008.04.021.
626. The development of island lakes of Lake Ladoga during the Late Pleistocene-Holocene / T.V. Sapelko, D.D. Kuznetsov, A.V. Ludikova [et al.] // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – No. 4. – P. 470-471. DOI 10.31951/2658-3518-2020-A-4-470.
627. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean / M. Kooi, J. Reisser, B. Slat [et al.] // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 33882. DOI: 10.1038/srep33882.
628. The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? / A.V. Ludikova, D.A. Subetto, A.A. Andreev [et al.] // Journal of Paleolimnology. – 2021. – Vol. 65, No. 1. – P. 85-99. DOI 10.1007/s10933-020-00150-0.
629. The Gulf of Finland Assessment / Ed. M. Raateoja, O. Setälä. – Rep. of the Finnish Environment Inst. 27. – Helsinki, 2016. – 363 p.
630. The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, arctic zone of Russia / Z. Slukovskii, V. Dauvalter, A. Guzeva [et al.]. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 1-17. DOI 10.3390/W12041130.
631. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in The Impact of Climate Change on European Lakes / L. Arvola, G. George, D.M. Livingstone [et al.] // Aquatic Ecology / Ed. D.G. George. – 2009. – Vol. 4. – P. 85-101. DOI 10.1007/978-90-481-2945-4_6.
632. The representative concentration pathways: an overview / P. van Vuuren Detlef, J. Edmonds, M. Kainuma [et al.] // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – P. 5-31.
633. The role of environmental factors in the formation of zooplankton in tributaries of Lake Ladoga (Russia) / E.A. Kurashov, D.G. Aleshina, M.A. Guseva [et al.] // Applied Ecology and Environmental Research. – 2017. – Vol. 15, No. 4. – P. 1511-1540. DOI 10.15666/aer/1504_15111540.
634. Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradients in 57 small lakes in southern Finland / H. Toivonen, P. Huttunen // Aquatic Botany. – 1995. – Vol. 51. – P. 197-221.

635. Tokarev I., Rumyantsev V., Rybakin V., Yakovlev E. Inflow of surface and groundwater to Lake Ladoga based on stable isotope (2H, 18O) composition / I. Tokarev, V. Rumyantsev, V. Rybakin, E. Yakovlev // *Journal of Great Lakes Research*. – 2022. – Vol. 48, No. 4. – P. 890-902. DOI 10.1016/j.jglr.2022.04.019.
636. Trifonova I., Pavlova O., Rusanov A. 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 // *Fundamental and Applied Limnology (Archiv fur Hydrobiologie)*. – 2007. – Vol. 167, No. 3-4. – P. 527-549.
637. UNEP. From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution // United Nations Environment Programme, 2021. – Nairobi. – 146 p.
638. UNEP. Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change // United Nations Environment Programme, 2016. – Nairobi. – 252p.
639. Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record / L.A. Savelieva, G.B. Fedorov, A.A. Andreev [et al.] // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48, No. 2. – P. 349-360. DOI 10.1111/bor.12376.
640. Vermeiren P., Muñoz C., Ikejima K. Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol / P. Vermeiren, C. Muñoz, K. Ikejima // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 262. – P. 114298. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114298.
641. Viant M.R. Metabolomics of aquatic organisms: the new 'omics' on the block / M.R. Viant // *Marine Ecology Progress Series*. – 2007. – Vol. 332. – P. 301–306.
642. Wastegard S., Wohlfarth B., Subetto D.A., Sapelko T.V. Extending the known distribution of the Younger Dryas Vedde Ash into northwestern Russia / S. Wastegrd, B. Wohlfarth, D.A. Subetto, T.V. Sapelko // *Journal of Quaternary Science*. – 2000. – Vol. 15, No. 6. – P. 581-586. DOI 10.1002/1099-1417(200009)15:6
643. Weisner S.E.B., Thiery G. Effects of vegetation state on biodiversity and nitrogen retention in created wetlands: A test of the biodiversity-ecosystem functioning hypothesis / S.E.B. Weisner, G. Thiery // *Freshwater Biology*. – 2010. – Vol. 55, No. 2. – P. 387-396. DOI 10.1111/j.1365-2427.2009.02288.x.
644. Wetzel R.G. *Limnology*. / R.G. Wetzel – 2nd ed. – Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983. – 439 p.
645. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world / S. Sharma, K. Blagrove, J.J. Magnuson [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2019. – Vol. 9, No. 3. – P. 227-231. DOI 10.1038/s41558-018-0393-5.
646. Willby N.J., Abernethy V.J., Demars B.O.L. Attribute-based classification of European hydrophytes and its relationship to habitat utilization / N.J. Willby, V.J. Abernethy, B.O.L. Demars // *Freshwater Biology*. – 2000. – Vol. 43. – P. 43-74.
647. Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smol J.P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change / C.E. Williamson, J.E. Saros, W.F. Vincent, J.P. Smol // *Limnology and Oceanography*. – 2009. – Vol. 54, No. 6, Part 2. – P. 2273-2282. DOI 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
648. World Health Organization. Guidelines for safe recreational water environments. Volume 1, Coastal and fresh waters / Chapter 8. Algae and Cyanobacteria. – Fresh Water. – 2003. – P. 136-158.
649. World Water Resources at the Beginning of 21st Century / Ed. I.A. Shiklomanov, J.C. Rodda. – Cambridge: University Press, 2003. – 450 p.
650. Wu X., Joyce E.M., Mason T.J. The effects of ultrasound on cyanobacteria / X. Wu, E.M. Joyce, T.J. Mason // *Harmful Algae*. – 2011. – Vol. 10, No. 6. – P. 738-743. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.06.005>
651. Yuan Z., Rajat N., Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment – From marine to food systems / Z. Yuan, N. Rajat, E. Cummins // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 823. – 153730. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.153730.
652. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results / M. Zobkov, E. Esiukova // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – Vol. 114, No. 2. – P. 724-732. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060.

**80 ЛЕТ
РАЗВИТИЯ ЛИМНОЛОГИИ
В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Формат 70x100 1/16
Гарнитура Times
Усл.-п. л. 30,69. Уч.-изд. л. 47,75
Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Верстка – УНИД РАН

Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 31.03.2023 г.
и распространяется бесплатно



ТАЛАН

УИИИО

ТАЛАН