

УДК 061.61:001.891:556.55

ДОСТИЖЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК РОССИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ОЗЕР ЗА ТРИ СТОЛЕТИЯ¹ (ОБЗОР)

© 2024 г. Н. Н. Филатов^{а, *}, И. С. Трифонова^б, В. А. Румянцев^с

^аИВПС КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185030 Россия

^бСПб ФИЦ РАН, ИНОЗ РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

^сСПб Научный центр РАН, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: nfilatov@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.08.2023 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

Работа посвящена 300-летию Академии наук России и 80-летию создания Института озераведения АН. Представлены основные итоги изучения озер России, полученные в Академии наук за три столетия. В XVIII в. Императорской Академией наук организованы первые “физические” экспедиции по обследованию озер, озерных регионов, а также Арала и Каспия. В 1916 г. при Императорской Санкт-Петербургской академии наук создана Комиссия по изучению оз. Байкал. После 1917 г. исследование озер значительно расширилось в связи с практическими запросами развития страны. В 1928 г. Президиум Академии наук преобразовывает Байкальскую экспедицию в Байкальскую лимнологическую станцию. В 1944 г. в Ленинграде была создана Лаборатория озераведения Академии наук, а в 1971 г. — Институт озераведения АН СССР. В 1970–1980-х гг. выполнены комплексные исследования озер и озерно-речных систем Европейской территории СССР по проектируемой трассе перераспределения водных ресурсов страны. В 1970–1980 гг. АН СССР участвовала в решении глобальных проблем лимнологии — эвтрофирования, закисления и загрязнения озер. В конце XX — начале XXI вв. особое внимание уделяется диагнозу состояния, разработке прогнозов изменения экосистем водоемов при разнообразных климатических и антропогенных воздействиях. Изданы обобщающие монографии об истории исследования озер в разных регионах страны, разработаны комплексные атласы крупных озер России. Открытие в Антарктиде приледникового оз. Восток, полученные научные результаты — выдающиеся достижения науки второй половины XX в. Показано, что исследования озер Академией наук России внесли значительный вклад в фундаментальную науку, решение практических задач экономики страны, значимы для разработки проблем гидрологии вод суши.

Ключевые слова: озера России, эвтрофирование, закисление, загрязнение, климат, модели, атласы, экосистемы.

DOI: 10.31857/S0321059624040017 EDN: AQDGIR

ВВЕДЕНИЕ

Авторы статьи поставили перед собой задачу — представить в ограниченных рамках журнальной статьи обзор научных и практических достижений Императорской Академии наук, Академии наук СССР и Российской академии наук в изучении озер за три века. Важно было выбрать из огромного объема фактического материала фундаментальные и практические результаты, выделить наиболее важные направления и идеи, привести имена выдающихся ученых и научных школ. Сделана попытка представить в статье масштабную картину развития отечественного

озераведения от первых географических описаний Байкала, Ладожского и Онежского озер в XVIII в., эпохи формирования лимнологии (озераведения) как самостоятельной научной дисциплины в XIX в. до современных комплексных, системных исследований озер России, требующих привлечения широкого круга специалистов во всех областях наук о Земле, проанализировать наиболее крупные достижения озераведения. Осознавая, что не все достижения отечественного озераведения удалось упомянуть, приводим достаточно большой список публикаций. Кроме того, можно воспользоваться ссылками на сайты академических организаций, которые постоянно обновляются и в них можно найти сведения как о ранее полученных важнейших результатах, так и о новых достижениях в озераведении.

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 22-17-00193).

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

*Начальный период изучения озер России
Академией наук*

Обследование озер для обеспечения практических запросов проводилось в России еще до создания Академии наук. Так, например, по личному поручению Петра I Д.Г. Мессершмидтом в 1723–1724 гг. выполнены первые обследования оз. Байкал. В 1732–1743 гг. члены Императорской Академии П.С. Паллас и И.Г. Георги впервые дали объяснение происхождения оз. Байкал, описали некоторых эндемиков озера, дали достаточно подробную характеристику флоры и фауны, описали байкальского тюленя и омуля и высказали гипотезу о неотектоническом происхождении озера. Для развития производительных сил России Императорской Академией наук в 1768–1774 гг. были организованы первые “физические” экспедиции на Европейском севере, в Поволжье, на Урале, Сибири, в Прикаспии, на Кавказе. По результатам работ экспедиций была дана комплексная картина природы обширного озерного края, Ладожского озера. Первым русским озероведом можно считать Н.Я. Озерецковского, который описал физико-географическую характеристику озера, растительность и животный мир Ладожского и Онежского озер, а позднее — озер Ильмень и Селигер. В 1792 г. была издана книга “Путешествие академика Н. Озерецковского по озерам Ладожскому, Онежскому” [60].

*Теоретическое обоснование озероведения в России как
раздела географии*

Основоположником озероведения в России можно считать выдающегося географа, этнографа, антрополога академика Д.Н. Анучина. Он предложил рассматривать озера как сложный элемент ландшафта, развивающийся в определенной среде и взаимодействующий с ней. Им предложена классификация озер и издан очерк “Воды суши. Озера” [4]. Этот же ландшафтный подход развивал впоследствии выдающийся географ, биолог, зоолог, озеровед академик Л.С. Берг. Его исследования

посвящены изучению Арала и Каспия, озер Западной Сибири, Ладожского, Балхаш, Иссык-Куль и многих др. Л.С. Бергом выполнены исследования пресноводных рыб, которые обобщены в монографии “Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран” [12], за которую Л.С. Берг был посмертно удостоен Сталинской премии первой степени.

Во второй половине XIX в. Б.И. Дыбовским (Иностранный член АН СССР, 1928 г.) и В.А. Годлевским — ссыльными польскими учеными — было открыто наличие в Байкале уникальной эндемичной фауны, обнаружены неизвестные ранее виды растений и животных [18]. Академик В.А. Обручев в 1889–1891 г. дал первое научное объяснение происхождения Байкальской впадины. Изучение озер Европейской территории России, таких как Ладожское, Онежское, Ильмень, Псковско-Чудское, проводилось как Академией наук, так и разными ведомствами для решения практических задач флота, водного транспорта, питьевого водоснабжения, рыболовства и др. По заданию военного ведомства гидрографической экспедицией под руководством А.П. Андреева в 1853–1867 гг. выполнено комплексное изучение Ладожского озера [2]. За монографию, посвященную этому озеру, Русское географическое общество наградило А.П. Андреева большой золотой и серебряной медалями. Первые оценки качества воды р. Невы и Ладожского озера для определения вод озера как источника водоснабжения г. Санкт-Петербурга были получены Отделом беспозвоночных Зоологического музея Академии наук [83]. Дальнейшее развитие исследований озер в системе Академии наук получило в результате коллективной записки физико-математического отделения Императорской Академии наук в 1916 г. видных ученых Д.Н. Анучина, А.Н. Северцова, Л.С. Берга, С.А. Зернова, В.А. Обручева, Г.Ю. Верещагина и ряда других, в которой указано, что “....Исследование Байкала представляет национальную задачу русских ученых...” [86]. На основании этой записки в 1916 г. при Императорской Академии наук была создана Комиссия по изучению озера Байкал (КИБ) и организована первая экспедиция КИБ по всестороннему исследованию озера. В этой экспедиции принял участие Г.Ю. Верещагин, которого по праву можно назвать осно-

вателем российской и советской школы озероведения [79, 86]. В конце XIX – начале XX вв. в условиях повторяющегося массового голода, вызванного неурожаем в России, исследования озер были направлены на изучение биологических ресурсов.

Исследования озер России в XX–XXI вв.

В 1915 г. начала работу Комиссия по изучению естественных производительных сил (КЕПС), которая для решения практических задач занималась изучением соленых озер, озерного сапропеля. Теоретические разработки озероведения продолжались в первой четверти XX в. Известным озероведом П.Ф. Домрачевым [29] разрабатывались принципы классификации и типологии озер с использованием данных по псковским, олонекским озерам и озерам Витебской губернии. В 1919 г. из состава КЕПС был создан Российский гидрологический институт (РГИ), а с 1926 г. он стал Государственным гидрологическим институтом (ГГИ), который планомерно занимался исследованиями озер. Практические и теоретические исследования озер проводились также сотрудниками Зоологического музея Академии наук. После 1917–1920 гг. стало невозможным проведение дальнейших экспедиций КИБ на Байкале, и Г.Ю. Верещагин назначается руководителем Олонецкой научной экспедицией (ОНЭ) РГИ, цель которой – исследование озер Карелии для решения практических задач. В 1925 г. “...академическая наука возвращается на Байкал под руководством Верещагина” [86]. С 1918 по 1925 г. Советская Россия была в полной международной изоляции, но уже в 1925 г. в России проходит III Съезд Международного объединения теоретической и прикладной лимнологии (SIL). По результатам работы на Байкале в 1927 г. Г.Ю. Верещагин был удостоен медали и почетного диплома SIL. В 1928 г. Президиум Академии наук преобразовывает Байкальскую экспедицию в Байкальскую лимнологическую станцию под руководством Г.Ю. Верещагина. На этой станции разрабатываются теоретические вопросы озероведения [19]. Фундаментальные исследования Байкальской станции были также тесно связаны с практической деятельностью таких организаций, как Байкаль-

ское пароходство, Гидроэнергопроект, Ангарскстрой, рыбохозяйственные предприятия и др. Верещагин впервые выдвинул идею аналогии озероведения с океанологией. Он считал, что Байкал по многим своим параметрам – водоем не озерного, а морского, даже океанического типа. Но Л.С. Берг последовательно отстаивал пресноводное происхождение байкальской фауны, за исключением явных морских иммигрантов – омуля и тюленя. В конце 1930-х гг. Г.Ю. Верещагин добивался создания Института в системе Академии наук, который занимался бы проведением комплексных исследований озер, разработкой теоретических проблем лимнологии, вопросами происхождения и истории развития типов озер, изучением физико-химических процессов, водного, химического и термического баланса озер, минеральной, энергетической, растительной базы, влиянием климата на озера. В результате в 1944 г. в Ленинграде была создана Лаборатория озероведения Академии наук СССР [106], но до этого выдающийся ученый-озеровед Г.Ю. Верещагин не дожил, он скончался на Байкале 1 февраля 1944 г. Во второй половине XX в. исследования озера и водосбора были продолжены под руководством выдающихся исследователей Г.И. Галазия, М.М. Кожова, О.М. Кожовой. Результаты исследований, посвященные оз. Байкал, представлены ниже.

После окончания Великой Отечественной войны началось активное изучение озерно-речных систем Севера ЕЧР, Урала, Восточной Сибири, Северного Кавказа, Донбасса. По результатам изучения водоемов Карело-Кольского региона под руководством С.В. Григорьева выполнены исследования озер и рек и опубликованы монографии “Водно-энергетический кадастр КАССР” и “Каталог озер Карелии” [27], отмеченные премиями Президиума Академии наук (АН) СССР. После 1946 г. исследования озероведов СССР были признаны и публиковались в виде обзоров за рубежом [111, 129]. Среди важнейших достижений русских-советских озероведов первой половины XX в. были исследования, проводимые на Косинской станции под руководством Л.Л. Россолимо, где впервые в мировой науке использован балансовый принцип в изучении трансформации энергии и круговорота вещества водоемов. Позд-

нее Россолимо написал монографию “Температурный режим озера Байкал” [71], за которую получил премию Президиума АН СССР, а в 1977 г. опубликовал книгу “Изменение лимнологических экосистем под воздействием антропогенного фактора” [70], в которой, обобщив мировую литературу, привлек внимание советских лимнологов к острой проблеме эвтрофирования озер, с которой в Европе и Америке столкнулись раньше, чем в России.

Изучение роли микроорганизмов в круговороте веществ в озерах и водохранилищах, разработка методов применения радиоактивных изотопов углерода и серы для изучения интенсивности процессов круговорота веществ в водоемах принадлежит выдающемуся микробиологу чл.-корр. АН СССР С.И. Кузнецову [45]. Заслуги С.И. Кузнецова были отмечены в 1971 г. медалью СИЛ имени Науманна, а в 1985 г. — Государственной премией СССР. Биоэнергетический подход в гидробиологии, который сыграл фундаментальную роль также и в развитии озероведения, был сформулирован одним из основоположников продукционной биологии В.С. Ивлевым. Его главный труд “Экспериментальная экология питания рыб” [36] стал большим событием не только для советской, но и мировой науки. Выдающийся вклад в развитие теории функционирования водных экосистем озер внесли работы чл.-корр. АН СССР Г.Г. Винберга по биотическому балансу, энергетическому обмену, питанию и росту водных организмов. Им создано новое направление — продукционная гидробиология, изучающая закономерности продукционных процессов в водоемах, сформулированное в монографии “Продукционно-биологические исследования экосистем пресных вод” [20].

К 1949 г. Лаборатория озероведения в Ленинграде сформировалась как центральное научное учреждение с двумя лимнологическими станциями — Байкальской и на оз. Пуннус-Ярви (Красное) под Ленинградом. Директором Лаборатории озероведения вначале был назначен академик Н.М. Страхов, а в 1946 г. — выдающийся геолог, академик Д.В. Наливкин. В 1953 г. Байкальская станция была передана Сибирскому филиалу АН СССР, а впослед-

ствии преобразована в Лимнологический институт Сибирского отделения АН СССР. В 1955 г. директором Лаборатории озероведения в Ленинграде стал выдающийся географ С.В. Калесник. Под его руководством были начаты фундаментальные комплексные исследования Ладожского, а позднее Онежского озер. Материалы многолетних исследований этих озер за 1956—1970 гг. обобщены в монографиях и опубликованы в 20 томах “Трудов лаборатории озероведения”. В 1971 г. усилиями С.В. Калесника лаборатория была преобразована в Институт озероведения (ИНОЗ АН СССР). Академиком С.В. Калесником сформулированы основные задачи отечественного озероведения [38]. В частности, им отмечалась необходимость комплексных исследований и ландшафтно-географического подхода. ИНОЗ АН СССР выполнял комплексные ландшафтно-лимнологические исследования на озерах, расположенных в разных физико-географических зонах, по результатам этих работ опубликована монография “Озеро и его водосбор — единая природная система” [30]. В 1970—1980 гг. ИНОЗ АН СССР проводил экспедиционные исследования озер и водосборов по всей территории СССР. Выполнялась географическая типизация озер различных озерных ландшафтов Северо-Запада России. На лимнологической станции Пуннус-Ярви Л.А. Жаковым проводились методические работы по интродукции ценных пород рыб в малые озера, и вместе с В.В. Меншуткиным им впервые в стране создана математическая модель популяции окуневого стада рыб озера [31]. Н.И. Семеновичем изучалась роль динамического фактора в формировании химического режима придонного слоя озера [81]. Успехи озероведов АН СССР были отмечены Международным обществом лимнологов (SIL), которое доверило АН СССР проведение XVIII Лимнологического Конгресса в 1971 г. в Ленинграде на базе Института озероведения АН СССР [106]. Обобщающая работа И.И. Николаева (ИНОЗ АН СССР и ОВП КФ АН СССР) “Очерк структуры и формирования годового лимнологического цикла водоемов умеренной зоны” [56] содержит, по существу, одну из первых эмпирических моделей структуры годового лимнологического цикла озера.

В 1970–1980 гг. в СССР под руководством чл.-корр. АН СССР Г.Г. Винберга проводились исследования по Международной Биологической Программе (МБП). Оценивалась биологическая продуктивность озер многих регионов мира, для ряда озер с круглогодичными наблюдениями был определен биотический баланс. Результаты работы ИНОЗ по этому направлению опубликованы в коллективной монографии [13].

Во второй половине XX в. возникла необходимость решения важнейших водных проблем по всей территории страны, связанных с гидро-энергетическим строительством на ряде крупных озер (Байкал, Онежское, Балхаш, Севан и др.), планируемым перераспределением водных ресурсов страны в Европейской и Азиатской частях СССР, научным обоснованием питьевого и промышленного водоснабжения, решением проблем эвтрофирования и закисления озер в условиях изменения климата. Для этого в АН СССР были созданы специализированные институты: Институт водных проблем (ИВП, Москва), Водных и экологических проблем Дальневосточного отделения (ИВЭП ДВО, Хабаровск), ИНОЗ (Ленинград), Водных и экологических проблем Сибирского отделения (ИВЭП СО, Барнаул), Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра (ИППЭС КНЦ, Апатиты), а после 1991 г. в Российской академии наук (РАН) были созданы институты: Водных проблем Севера КарНЦ (ИВПС КарНЦ РАН, Петрозаводск), Байкальский институт природопользования СО РАН (БИПП СО, Улан-Удэ), Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН (СПБО ИГЭ, Санкт-Петербург), Аридных зон ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону). Эти организационные меры РАН позволили охватить исследованиями основные озерные регионы России; разработать и внедрить новые методы исследований озер: дистанционные спутниковые, 3D-модели, геоинформационные системы, методы теории искусственного интеллекта для классификации водоемов; дать количественную и качественную оценку водных ресурсов озер; выявить причины эвтрофирования и закисления озер России; разработать рекомендации по восстановлению экосистем озер; дать предложения по совершенствованию законодательства для сохранения

озер (Закон об охране оз. Байкал [92], Проект закона об охране Ладожское и Онежского озера ([72, 78] и др.).

ДОСТИЖЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК В ОБЛАСТИ КЛЮЧЕВЫХ ПРОБЛЕМ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

Изучение влияния общей увлажненности на водные объекты. Климат и озер

Академик Л.С. Берг был одним из первых, кто положил начало изучению влияния климата на континентальные водоемы [10]. В 1908 г. он отмечал, например, что уровень Арала, как и других озер региона, значительно менялся, повышался и понижался, что определялось климатическими условиями [9]. Во второй половине XX в. под руководством докт. геогр. наук, профессора А.В. Шнитникова в ИНОЗ АН СССР изучались колебания общей увлажненности ландшафтов и определялось влияние ее на озера [100]. Им исследовались Ладожское и Онежское озера, озера в лесостепных, степных, полупустынных, а позднее — горных ландшафтах (Прикаспийской низменности, юга Западной Сибири, Казахстана, Средней Азии). А.В. Шнитникову удалось выявить общие закономерности изменчивости увлажненности изученных территорий Евразии, им определены флуктуации уровня вод озер с ритмом изменчивости от внутривекового до 1800–1900 лет [100]. Этот ритм был назван “циклом Петерссона–Шнитникова”. А.В. Шнитниковым и Н.П. Смирновой в 1975–1979 гг. установлено, что на оз. Чаны каждые 30–35 лет возникали трансгрессии за счет увеличения стока питающих его рек, длящиеся 6–8 лет и приводящие к повышению уровня [68]. Исследования оз. Чаны были продолжены Институтом водно-экологических проблем (ИВЭП СО РАН), созданным в 1987 г. по инициативе академика О.Ф. Васильева [15, 59]. По данным длительных наблюдений за колебаниями уровня воды оз. Чаны в 1898–2000 гг. были определены флуктуации с цикличностью порядка 40 лет, связанные с природными изменениями водности рек бассейна [16, 56]. В ИВЭП СО РАН также проводится многолетнее комплексное изучение одного из самых глубоких озер России — Телецкого [16, 61, 94]. Результаты выполненных исследований положены в обоснование включения оз. Телецкого

с 1998 г. в список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО.

Изучения закономерностей изменения климата, элементов водного баланса озер России показали, что при заметном глобальном потеплении климата после 1980 г. на водосборах крупнейших озер России реакция гидрологического режима, колебаний уровня воды и экосистем озер существенно различалась в зависимости от региональных особенностей водосборов, влияния разных антропогенных факторов. В колебаниях уровня воды озер Байкал, Ладожского и Онежского отмечается вековой тренд и квазициклические флуктуации временных масштабов 30 и несколько лет [97, 105, 127]. Для долгосрочных прогнозных оценок уровня воды Ладожского и Онежского озер успешно использовались вероятностные модели межгруппового учета аргументов, модели периодически-коррелированных случайных процессов, а также динамико-стохастические модели с использованием разнообразных сценариев изменений климата [77]. Инструментальные наблюдения за уровнем Каспия за более чем 100-летний период, разработанные методы и климатические модели не дали возможности получить надежный прогноз уровня Каспия на длительную перспективу (годы) вследствие исключительной специфики физико-географических, климатических, гидрологических и иных условий Каспия [14, 21]. Результаты исследования уровня режима оз. Байкал в естественных условиях и подпора показывают, что в измененных гидрологических условиях для управления водопользованием озера необходимо учитывать особенности водного режима не с приближением на средние условия водности, а с учетом возможных экстремальных условий в периоды с аномально низкой или высокой водностью [82]. Анализ удаленных связей внутривековой изменчивости уровня крупнейших озер России и Великих американских озер не выявил общих глобальных закономерностей, которые позволили бы улучшить возможности долгосрочного прогноза внутривековых колебаний уровня [97, 108, 109]. За последние 50 лет при заметном потеплении климата на крупных озерах России — Байкале, Ладоге, Онеге, Таймыре — отмечена устойчивая тенденция к более поздним срокам установления и более

ранним срокам разрушения ледяного покрова и к уменьшению продолжительности ледостава на ~2 недели [97, 109, 119], что согласуется с такими же датами для крупных озер Европы, Северной Америки. При потеплении климата в крупнейших озерах Европы — Ладожском и Онежском — наблюдался рост биомассы, а при дальнейшем потеплении — снижение биомассы фитопланктона, что объясняется тем, что водоросль *Aulacosira islandica* развивается только при температуре воды $\leq 8^{\circ}\text{C}$, а эта водоросль дает главный вклад в биомассу фитопланктона весной и осенью [80]. Важный вывод проведенных до начала 2000-х гг. натурных и численных экспериментов — то, что антропогенный пресс — основной фактор, определяющий состояние и изменения экосистемы в озерах. Но в первые две декады XXI в. более заметным и сравнимым с силой антропогенного воздействия на экосистемы Ладожского и Онежского озер становится влияние потепления климата [80, 124]. Оценки возможных изменений гидротермодинамического режима и реакции экосистемы на изменения климата показывают, что к середине XXI в. воздействие потепления на крупные озера будет еще более значительным [97]. К настоящему времени доказано, что в результате увеличения температуры воздуха за последние 50 лет возросла продолжительность “биологического лета” Ладожского и Онежского озер [108]. В работах Н.М. Калинин, Е.В. Текановой и др. [44, 117] показано, что при потеплении климата в зимний период с возрастанием речного стока отмечалось поступление аллохтонных веществ гумусового происхождения, что привело к возрастанию цветности воды, концентрации общего железа и углекислого газа в заливах. Это явление — так называемого покоричневения (браунификации) вод — типично для многих озер бореальной зоны. Одна из важнейших причин продолжающегося изменения состояния (эвтрофирование, загрязнение) крупных озер России — кумулятивное воздействие антропогенных и природных факторов в долгосрочном масштабе времени [97, 117].

Типизация, классификация озер и озерных регионов

В России насчитывается более 3 млн озер, расположенных в разных ландшафтных зо-

нах, поэтому разработка принципов их типизации — важнейшая задача для качественной и количественной оценки озерных ресурсов России. Это направление было развито в ИНОЗ АН СССР С.В. Калесником и его коллегами. В 1970–1980 гг. в ИНОЗ разработаны разные классификации и схемы районирования озер России по характеру котловин, трофности, химизму, термическим типам и т. д., которые подробно изложены в [84]. Современная классификация территории России по озерным районам (ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН) проводится с помощью геоинформационных методов с использованием аэрокосмической информации, цифровых карт. Границы озерных районов проводились с учетом ландшафтных зон, физико-географического районирования территории России и границ бассейнов рек. Для территории России по озерности выделяют 7 категорий от $<0.5\%$ до $>10\%$ [125] (рис. 1).

Наибольшая озерность отмечается для территории Карелии, которая достигает 21%, а также в Прикаспийском районе и в Большеземельной тундре. В ИНОЗ в XX в. проведена современная оценка озерного фонда России [73–75]. Озерные водные ресурсы РФ оценены в $\sim 25\,970\text{ км}^3$, в том числе $>50\text{ км}^3$ — воды повышенной минерализации. В искусственных водоемах содержится $\sim 830\text{ км}^3$. На крупнейшие озера приходится $>95\%$ общего объема пресных озерных ресурсов. Почти $24\,000\text{ км}^3$ озерной воды в первой декаде XX в. могут быть отнесены к условно чистым, сохраняющим оли-

готрофный статус. Для многих наиболее экономически развитых областей РФ, в которых отсутствуют крупные водоемы, доля условно чистых озерных вод составляет доли процента [75]. Выявлены изменения озерного фонда ЕЧР за последние 50 лет, свидетельствующие о продолжающемся постепенном уменьшении площади водного покрытия Восточно-Европейской равнины. Наиболее значимые изменения отмечены в регионах, уже характеризующихся водным дефицитом [73, 74].

Результаты решения одной из глобальных проблем современной лимнологии — эвтрофирования озер

Организации АН СССР участвовали в решении одной из глобальных проблем современной лимнологии — изучении эвтрофирования озер. В 1960 г. крупные озера России (Ладжское, Онежское, Байкал), как и многие озера мира стратегического значения для экономики регионов, подверглись загрязнению и антропогенному эвтрофированию из-за роста фосфорной нагрузки. В 1970-х гг. в институтах АН СССР были выполнены фундаментальные исследования антропогенного эвтрофирования крупнейших озер Европы [3, 101, 106]. Например, к началу 1980-х гг. биогенная нагрузка на оз. Ладжское выросла почти в 3.5 раза — от 2430 до 8100 т Р/год, на его водосборе в конце XX в. функционировало почти 600 промышленных предприятий [47, 49]. В Ладжском и Онежском озерах резко сократилась численность рыб, в особенности таких, как лосось, форель, паля, сиг, судак и др. Принятые в 1980–2000 гг.

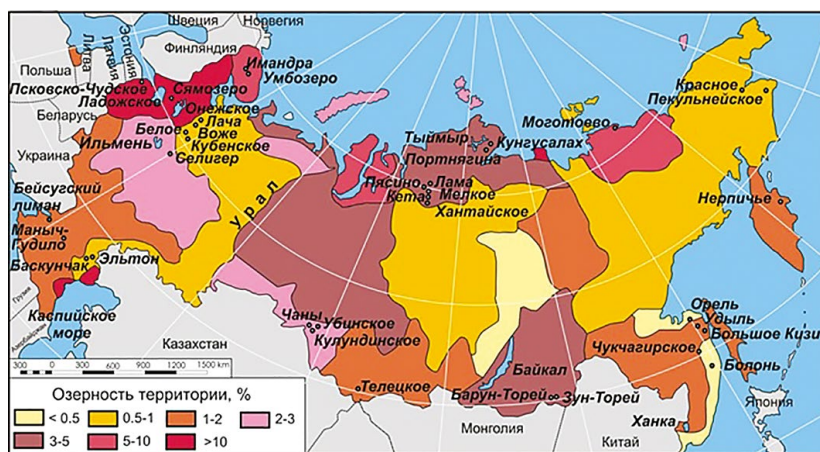


Рис. 1. Картограмма озерности территории России, % ([109] с изменениями).

меры привели к снижению фосфорной нагрузки: в 1984–1995 гг. в среднем 6040, в 1996–2005 гг. — 3580, а в 2006–2011 гг. — 3000–5000 т Р/год [46, 75, 74, 85]. В результате исследований ИНОЗ, ОВП (Отдел водных проблем Карельского филиала АН СССР), ИППЭС КНЦ, ЛИН СО АН СССР и других организаций были выявлены особенности и причины процесса антропогенного эвтрофирования крупнейших озер Европы [48, 49]. Из-за загрязнения крупных озер тяжелыми металлами, нефтепродуктами и различными другими органическими соединениями, в том числе токсичными, у ряда гидробионтов в бентосе и планктоне были выявлены характерные морфологические деформации, а у рыб отмечена высокая степень токсикозов. На основе данных научных исследований АН СССР, Гидрометслужбы, ряда ведомственных организаций вышло Постановление Совмина СССР № 1212 от 7.12.1984 “О дополнительных мерах по обеспечению охраны и рационального использования водных и других природных ресурсов бассейна озер Ладожского, Онежского и Ильмень”. По инициативе Института озераведения в 1986 г. был закрыт Приозерский ЦБК, который существенно загрязнял воды западного побережья озера, что создавало опасность для обеспечения Ленинграда качественной питьевой водой. После распада СССР в начале 1990-х гг. произошло резкое сокращение экономической деятельности на водосборах Ладожского и Онежского озер. Наблюдалось существенное уменьшение биогенной нагрузки и сброса вод от точечных и распределенных источников. Так, например, поступление фосфора в оз. Ладожское в 2000-х гг. уменьшилось почти в три раза — с 6–7 до 2 тыс. т в год. В результате этого заметно повысилось качество вод, началось постепенное изменение трофического статуса водоемов [44, 47]. По данным натурных наблюдений и математического моделирования [47, 110, 124, 126], основной вклад в эвтрофирование Ладожского и Онежского озер примерно до 2010 г. вносили антропогенные факторы. После уменьшения антропогенной нагрузки в 1990-е гг. возросла роль внутриводоемных процессов и отметились замедление восстановления экосистемы. А в последние годы в экосистеме наиболее заметны изменения, обусловленные потеплением климата [28]. С помощью только данных длительных натурных экспериментов на озерах Ладожском, Онежском и Байкал не удалось диагностировать причины мед-

ленного восстановления экосистем, возможно, это было обусловлено влиянием таких факторов, как водные грибы, бактериопланктон, поэтому важное значение приобретают моделирование водных экосистем и проведение численных экспериментов с использованием математических моделей [24, 28, 85, 126]. По результатам многолетних наблюдений и моделирования крупнейших озер Европы были получены оценки допустимой антропогенной нагрузки, ассимиляционного потенциала (АП) озер по поступлению биогенов в озера [80]. Так, АП по фосфору в оз. Ладожское должен быть 1800 т Р/год. Однако реально возратить озеро в олиготрофное состояние представляется экономически труднореализуемым. Для оз. Онежского с помощью 3D-модели получены оценки АП по сбросу фосфора — 800 т P_{total} /год и по сбросу азота — 15000 т N_{total} /год [85, 124].

На Лимнологической станции Пуннус-ярви по многолетним данным проводились фундаментальные исследования эвтрофирования малых озер Карельского перешейка, были выполнены многолетние исследования, комплексный многолетний мониторинг оз. Красного [54]. Выделены показатели перехода водоема из одного трофического статуса в другой [62, 89, 90, 99].

С 1977 по 1984 г. ИНОЗ АН СССР проводил исследования малых озер Латгальской возвышенности (Латвийская ССР) с целью оценки изменения озерных экосистем под антропогенным воздействием, прежде всего сельскохозяйственного преобразования водосборов — сведения лесов, распахивания, мелиорации, внесения удобрений [87–89]. Исследования показали резкое возрастание биологической продуктивности озер в результате обогащения питательными веществами. Повышение концентраций биогенных элементов, поступающих в озеро, ведет к нарушению сбалансированности экосистемы. Это, прежде всего, сказывается на отставании деструкционных процессов от продукционных, следовательно — на интенсивном накоплении в озере органического вещества. Нарушение сбалансированности экосистемы связано не только с развитием автотрофных организмов, но и с ограничением развития популяций гетеротрофных организмов, в первую очередь бактерий. В 1986–1989 гг. комплексная экспедиция ИНОЗ

проводила масштабные исследования тундровых озер в СССР, впервые исследовано влияние интенсивной нефтегазоразведки на озера в условиях Заполярья (Большеземельская тундра). Установлено, что некоторые мелководные загрязняемые озера региона вполне сравнимы по величине первичной продукции с эвтрофными озерами умеренной зоны. В них отмечается продолжительное “цветение” воды за счет массового развития цианобактерий, и большинство озер в этом районе в наибольшей степени уязвимо к антропогенному воздействию [63, 89].

Изучение закисления озер

Одна из важнейших проблем современной лимнологии конца XX — начала XXI вв. — закисление озер из-за влияния выбросов кислотообразующих газов на воды суши и водные экосистемы. Особенно уязвимыми в отношении процессов закисления оказались низко минерализованные воды малых озер северных регионов страны: Карело-Кольского региона, а также озер Архангельской и Вологодской областей, Ямало-Ненецкого автономного округа. Под руководством Т.И. Моисеенко и др. [55], П.А. Лозовика и др. [50] получены данные о сопряженном поведении химических элементов (гумусовые кислоты, тяжелые металлы) в закисленной среде вод; изменениях физиологических функций организмов рыб в закисленной среде и структурно-функциональной организации водных экосистем. В указанных работах предложены алгоритмы расчетов критических нагрузок кислотообразующих веществ, даны оценки превышения нагрузок на ЕЧР и в Западной Сибири, разработаны гидрогеохимические критерии состояния и устойчивости к антропогенному воздействию поверхностных вод; выявлен вклад природных и антропогенных факторов закисления вод.

Комплексные исследования озер в связи с решением государственных задач. Оценка возможностей перераспределения водных ресурсов страны (“переброски стока”)

Из-за значительных антропогенных изменений гидрологического режима Каспия и неожиданно резких природных изменений уровня вод

на протяжении XIX–XX вв. для стабилизации уровня вод Каспия и решения задач экономики региона в 1972 г. был разработан проект перераспределения водных ресурсов (так называемая “переброска”) с Севера СССР в бассейн Волги [66]. В исследованиях приняли участие 134 организации, а Институт водных проблем АН СССР был назначен головной организацией. Планировалось использовать часть стока рек Печоры, Северной Двины, Онеги и Невы и часть водных ресурсов озер Севера (Онежского, Воже, Лача, Кубенского, Белого, Рыбинского водохранилища). В конце 1970-х — начале 1980-х гг. по трассе перераспределения водных ресурсов (переброски) осуществлялись масштабные комплексные лимнологические исследования этих водоемов. Итоги работ экспедиций ИНОЗ опубликованы в нескольких монографиях (например, [3, 22]). Показано, что озера Лача и Воже могут прекратить свое существование как водоемы с замедленным водообменом с постепенным превращением их в транзитную группу водоемов. Потери рыбопродуктивности в этих озерах составили бы до 90%, что означало полную утрату их рыбопромыслового значения [22]. Выявлены возможные негативные изменения экосистемы Онежского озера при изъятии части стока из водного баланса [36]. АН СССР подготовила отрицательные заключения о реализации этого проекта, а группа геологов-академиков во главе с А.Л. Яншиным направила письмо в ЦК КПСС “О катастрофических последствиях переброски части стока северных рек”. В результате 14 августа 1986 г. вышло постановление ЦК КПСС и СМ СССР “О прекращении работ по переброске части стока северных и сибирских рек”. В качестве положительного результата исследований по проекту переброски отметим, что благодаря скоординированной работе научных и проектных организаций удалось получить важные научные выводы о состоянии и закономерностях изменений водных систем по трассе переброски, которые оказались полезными для рационального использования и охраны ресурсов озер [22].

К решению проблемы загрязнения и эвтрофирования оз. Севан

Из-за сработки вековых запасов воды оз. Севан — самого крупного из высокогорных озер

мира — на нужды энергетики, орошение земель в Араратской долине к 1970 г. уровень вод озера упал на 18 м, уменьшился водообмен между Большим и Малым Севаном, озеро достаточно быстро перешло в эвтрофное состояние. Глубокие изменения в экосистеме озера, ухудшение качества воды и подрыв его рыбохозяйственной ценности привели к необходимости принятия безотлагательных мер по сохранению водоема как централизованного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения Армянской ССР. Возникла так называемая “севанская проблема”. Было принято Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 812 от 28 сентября 1978 г. “О мерах по охране и рациональному использованию природных ресурсов озера Севан”. Для решения “севанской проблемы” в 1980-х гг. проведены комплексные исследования озера, в которых принимали участие более 40 организаций СССР, в том числе институты АН СССР под руководством ИНОЗ (А.Ф. Трешникова и В.А. Румянцева). По результатам экспериментальных исследований и моделирования было показано, что главной мерой по оздоровлению озера, улучшению качества его воды и восстановлению его рыбохозяйственной значимости может быть подъем уровня воды на 6 м [104]. К сожалению, возродить экосистему оз. Севан, как планировалось в результате исследований по “севанской проблеме”, не получилось из-за распада СССР. Рекомендации по пополнению вод озера и поднятию уровня воды на 6 м за счет стока рек соседних государств в настоящее время не представляется возможным. Отметим, что в XX в. успешно продолжают совместные исследования оз. Севан при участии организаций РАН (Институт биологии внутренних вод РАН и ЮНЦ РАН) [102].

Изучение минеральных озер

Первые исследования Каспия и Арала были выполнены морскими офицерами, которые составляли карты этих водоемов, а первые академические экспедиции в 1768–1774 гг. под руководством академиков П.С. Палласа и И.Г. Гмелина позволили получить сведения о геологии и биологии Каспия. Они выдвинули гипотезу, что многолетние колебания уровня моря зависят от климатических факторов.

Началом научно-промысловых исследований Каспия следует считать экспедицию академика К.М. Бэра (Иностранный почетный член Академии наук). К.М. Бэр первый выполнил химический анализ каспийской воды. В 1897 г. было определено, что Кара-Богаз-гол — величайший в мире аккумулятор глауберовой соли (сульфата натрия), на дне залива обнаружен пласт глауберовой соли. Особый вклад в изучение Каспия внес замечательный русский ученый Н.М. Книпович, который в 1904–1915 гг. провел несколько экспедиций [38]. По результатам были опубликованы труды по гидрологии и гидробиологии, составлена первая карта вертикальной циркуляции вод. При АН СССР была создана особая “Каспийская комиссия”, возглавляемая Н.М. Книповичем, а в 1918 г. при ВСНХ был создан Комитет по изучению Кара-Богаз-гола во главе с Н.С. Курнаковым. Подсчитано, что на дне залива и его берегах осаждается ~6 млн т соли в год. Крупный вклад в исследования континентальных водоемов Каспия, Арала, Байкала, Балхаша и Иссык-Куля внес академик Л.С. Берг. Работы Л.С. Берга оказали большое влияние на формирование научного мировоззрения не только советских озероведов, но и лимнологов всего мира [9–12]. Во второй половине XX в. комплексные исследования Каспия и его бассейна были проведены в ИВП РАН [14, 66]. В XXI в. исследования Каспия продолжаются как РАН, так и Росгидрометом [21, 28]. В 2020-х гг. в Институте вычислительной математики (ИВМ) и ИВП РАН Н.А. Дианским и Т.Ю. Выручалкиной, А.В. Фроловым разработана и реализована методика расчета водного баланса озера/моря по данным транспорта влаги в атмосфере над его зеркалом и бассейном водосбора из современных атмосферных реанализов [28]. Н.А. Дианским использована система оперативного диагноза и краткосрочного прогноза (СОДИП) гидрометеорологических характеристик Каспия, основанная на региональной негидростатической атмосферной модели WRF и модели морской циркуляции ИВМ. Чл.-корр. РАН Р.А. Ибраевым и Г.С. Дьяконовым разработана вихререшающая 3D-модель трехмерной циркуляции Каспия, предназначенная для исследования изменчивости его уровня и термохалинных полей от синоптического до климатического масшта-

ба [28]. Несмотря на предпринимаемые исследования специалистами многих стран, проблема долгосрочного прогноза уровня воды Каспия до сих пор не решена.

Исследования Аральского моря уже более двух столетий вызывают интерес мирового научного сообщества и имеют важное социальное, практическое и фундаментальное научное значение. Целенаправленное изучение Приаралья началось с середины XVIII в. В 1905 г. опубликованы исследования А.А. Тилло и Ю.М. Шокальского, в которых приведена площадь Аральского моря. В 1899–1902 гг. и в 1906 г. Л.С. Берг подробно обследовал водоем и в 1908 г. опубликовал монографию “Аральское море. Опыт физико-географической монографии” [9]. За этот труд в 1909 г. Русское географическое общество присуждает ему золотую медаль П.П. Семенова-Тян-Шанского. В XX в. в СССР проводились систематические наблюдения за физическими, химическими и биологическими характеристиками моря. На основе этих исследований были опубликованы сотни статей и ряд книг. С 1961 г. вследствие климатического и, главным образом, антропогенного (безвозвратное использование вод питающих море рек Амударьи и Сырдарьи на нужды орошения) факторов, нарушивших водный баланс Арала, началось его постепенное обмеление с уменьшением площади зеркала и объема. В конце 1980-х гг. уровень воды упал настолько, что все море разделилось на две части: северный Малый Арал и южный Большой Арал. Обмеление Аральского моря привело к существенным изменениям его морфометрических и гидрофизических характеристик, термохалинной структуры, биологических и других параметров. Благодаря расчетам и экспертизе ученых АН СССР предложенный план спасения Малого Аральского моря посредством постройки плотины в проливе Берга, которая стала препятствовать падению уровня моря, Н.В. Аладин был награжден почетным знаком Международного фонда спасения Арала. В XXI в. исследования Арала продолжают осуществлять сотрудники лаборатории ЗИН РАН под руководством докт. биол. наук Н.В. Аладина [1] и ИО РАН под руководством чл.-корр. РАН П.Ю. Завьялова [32, 115].

Исследования минеральных озер проводились организациями АН СССР на огромном

пространстве СССР. С 1950-х гг. исследование соленых озер было связано в основном с изучением минерально-сырьевой базы таких известных озер, как Балхаш, Индер, Кучук, Маныч, Эльтон, Баскунчак, зал. Кара-Богаз-Гол. Исследования бассейна Западного Маныча имеют более чем двухсотлетнюю историю. Маныч имеет реликтовое происхождение, является остатком огромного водоема, соединявшего в доисторические времена Каспийское и Черное моря. Однако обобщающих экологических исследований, затрагивающих тенденции изменений водной экосистемы оз. Маныч-Гудило, долгое время не проводилось. В 1989–1991 гг. ИВП РАН совместно с Севкавгипроводхозом были уточнены его водно-солевой режим и гидробиологические характеристики. В XXI в. в ЮНЦ РАН выполняют исследования соленого бессточного оз. Маныч-Гудило. Особенность водно-солевого режима гидробиоценоза оз. Маныч-Гудило состоит в наличии участков акватории с различной соленостью.

Современные исследования лимногенеза соленых озер развивают новые аспекты лимнологии как комплексной, фундаментальной науки, имеющей широкое прикладное значение с учетом того, что почти 600 млн человек на Земном шаре живут в условиях аридных и семиаридных зон. Отметим оз. Ши́ра (в Красноярском крае) — одно из самых упоминаемых в научных статьях соленых озер современной России (после Каспия) и меромиктических озер. Результаты исследований оз. Ши́ра, которые проводятся Институтом биофизики СО РАН (Красноярск), опубликованы в первой в мире монографии по неперемешиваемым, меромиктическим озерам [105].

Некоторые результаты исследований оз. Байкал во второй половине XX — начале XXI в.

Исследования Байкала имеют важное практическое, социальное и фундаментальное значение и вызывают интерес на протяжении трех столетий не только у академических организаций России, но и мирового научного сообщества. Выдающийся вклад в исследования альгологии; водной экологии оз. Байкал внесли работы М.М. Кожова и О.М. Кожовой [79], де-

тельность которых была связана с Байкальской лимнологической станцией Академии наук, Лимнологическим институтом СО АН, ИГУ. О.М. Кожовой вместе с Л.Я. Ащепковой и В.В. Меншуткиным была создана первая математическая модель оз. Байкал с учетом трехмерной циркуляции вод, даны предложения по сохранению его экосистемы [53]. Многолетние комплексные исследования выполнены в ЛИН СО АН СССР под руководством Г.И. Галазия, в Институте географии СО РАН и БИПП СО РАН созданы комплексные атласы озера и водосбора [7, 8, 58]. В 1990 г. при Лимнологическом институте АН СССР по инициативе М.А. Грачева и В.А. Коптюга был создан Байкальский международный центр экологических исследований. Во второй половине XX в. на Байкале выполнен огромный объем научных исследований, обобщить которые непросто. В 1990–1991 гг. на оз. Байкал в рамках программы фундаментальных исследований РАН проведены экспедиции на подводных аппаратах “Пайсис”. В 2008–2009 гг. выполнены международные научно-исследовательские экспедиции на аппаратах ИО РАН “Мир”. На дне Байкала открыты нефтеносные структуры, изучены древние уровни стояния байкальских вод [93]. В работе М.А. Грачева обобщены сведения о состоянии экосистемы оз. Байкал на 2002 г. [26]. Подсчитано, что в 1987–1988 гг. из-за морбилливируса чумы плотоядных погибло ~6 тыс. голов байкальских тюленей. По результатам реализации проектов “Байкал-Бурение” создана цифровая модель рельефа (ЦМР) дна озера. В 1997–2022 гг. открыты и изучены природные газовые гидраты, не встречающиеся ни в одном пресноводном водоеме. К 2022 г. на Байкале открыто 60 мест с приповерхностным скоплением газовых гидратов. За последние два десятилетия зарегистрировано увеличение концентрации метана в 2–2.5 раза [120, 129]. В районах разгрузки газосодержащих минерализованных флюидов Байкала выявлены представители разных таксонов, имеющие высокое сходство с микроорганизмами из морских гидротермальных выходов “черных курильщиков”, газогидратных осадков. В результате работ по проектам глубоководного бурения “Байкал-бурение” (1993–1998 гг.) и “Хубсугул-бурение” (2003 г.) получены палеолетописи последних 8 млн лет. А.П. Федотовым реконструированы палеоклиматы Восточной

Сибири по отложениям и обнаружен глубокий (семикилометровый) слой, слагающий дно оз. Байкал [93]. В 1990-х гг. на Байкале был открыт механизм вынужденной конвекции, которая приводит к интрузиям холодных поверхностных вод в глубинные и придонные слои, и за их счет происходит аэрация глубинных вод озера [99]. Современные сведения о тепловом балансе оз. Байкал и связи ледово-термического и водного режима с глобальной атмосферной циркуляцией Северного полушария подробно представлены в работе [127]. В 2003 г. в южной части Байкала в районе пос. Слюдянка в ледяном покрове были открыты гигантские кольца (вихри) в диаметре 5–7 км, которые могут быть связаны с высокоинтенсивным выходом из донных отложений газов (метана) [25]. Разные механизмы генерации этих вихрей описаны в работе [122]. В.Н. Зыряновым с коллегами [35] предложена гидродинамическая теория, согласно которой в районе наблюдаемых ледовых колец подо льдом образуются геострофические вихри, обусловленные подводными каньонами. Исследования Т.В. Ходжер с коллегами [120] показали, что пелагиаль озера остается стабильной, проблемы локального загрязнения прибрежных вод акватории биогенными элементами, органическими веществами, поступающими с притоками от населенных пунктов и туристических комплексов, расположенных на побережье озера, и постоянно увеличивающееся количество судов — остаются сегодня главными для экосистемы озера. Качество вод прибрежной зоны Байкала значительно ухудшилось из-за массового развития несвойственной ранее для Байкала водоросли спиригиры, аномального количества гниющих водорослей на побережье озера, что привело к массовой гибели байкальских эндемичных губок [87]. Все это можно считать и фактором перестройки в нативных эндемичных сообществах, и следствием сброса в озеро практически неочищенных сточных вод [128]. Массовое заболевание и гибель эндемичных байкальских губок прогрессирует последние 10 лет и сопровождается существенным сдвигом в составе микробного сообщества. Отмечается увеличение количества видов сапрофитных бактерий. В работе [8], выполненной в БИПП СО РАН под руководством академика А.К. Тулохонова, показано, что в настоящее время наиболее высокую техноген-

ную нагрузку испытывает главный приток озера — р. Селенга. Экологическая ситуация усугубляется маловодными периодами, при которых увеличивается трофность, снижается качество воды, происходит заболачивание проток и озер дельты. Установлено, что в годы низкого стока рек поступление в Байкал минерального фосфора и кремния с водами Селенги снизилось более чем в 2 раза и в 3 раза возросло поступление общего фосфора. Важное достижение ученых, в первую очередь ЛИН СО РАН, БИПП СО РАН, Института географии СО РАН, — участие в разработке научного обоснования Федерального закона Российской Федерации “Об охране озера Байкал”, принятого в 1999 г. [92], в котором закреплено понятие “Байкальская природная территория” (БПТ). Крупным достижением стало включение оз. Байкал в 1996 г. в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Байкал — достояние всего человечества и заслуживает бережного отношения, охраны и внимания мирового сообщества. Многочисленные эндемичные виды Байкала и его 25-миллионная древняя история делают озеро идеальной естественной лабораторией для ответа на вопросы о происхождении и эволюции этого озера.

ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ГИДРОФИЗИКИ, ГИДРОДИНАМИКИ, МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЗЕР

Результаты изучения термики и гидродинамики озер

Впервые исследования водного баланса, термического режима, гидродинамики вод озер Ладожского, Онежского и Байкал были проведены в 1960–1970 гг. [17, 23]. А.И. Тихомировым дано детальное описание явления термобара для пресноводных крупных озер [88]. Его исследования опередили подобные работы, выполненные на Великих Американских озерах. В.И. Верболовым [17] впервые получены схемы циркуляции вод озера, выявлена тенденция доминирования циклонической циркуляции вод в Байкале. В 1970–1980 гг. в ИНОЗ РАН выполнены натурные и численные эксперименты термогидродинамических процессов и явлений на озерах России СССР (Онежском, Ладожском, Севан, Балхаш, Байкал, Красном, Рыбинском водохранилище), а также ряде озер Финляндии, Болгарии. Выявлены закономерности

циркуляции вод, внутренних волн апвеллингов, термобара, мелкомасштабной, циркуляций Ленгмюра, турбулентности в озерах. Оценен вклад разных составляющих в формирование циркуляции вод крупных озер мира, результаты обобщены Н.Н. Филатовым в монографиях [95, 96]. Внедрены в лимнологию методы гидродинамического синтеза наблюдений и моделирования, разработанные для океана по программе ГКНТ “Разрезы” академиком А.С. Саркисяном и учениками [95]. Продуктивным оказался подход, предложенный В.В. Меншуткиным к изучению озер и озерных систем с использованием баз данных и баз знаний (БД и БЗ) для озерных регионов с применением методов теории искусственного интеллекта, нечетких множеств, логико-лингвистических и когнитивных моделей для сложных социо-эколого-экономических систем [52]. Создана экспертная система (ЭС) “Озера Карелии” [59].

В начале XXI в. в озерах Ладожском, Онежском, Байкале в донных осадках выявлен в высоких концентрациях микропластик (МП). В оз. Онежском концентрация МП оказалась сравнимой с содержанием МП, обнаруженного в реках густонаселенных районов Китая, и как минимум в два раза превышает среднее содержание МП в донных осадках Балтийского моря [33]. По загрязненности МП Ладога и Байкал сравнимы с Великими американскими озерами и озерами Европы [33, 65]. Впервые с использованием авторской методики (В.А. Румянцев и др. [76]) было выявлено наличие потенциально опасных наночастиц и наноразмерных ассоциатов металлов в водных экосистемах бассейна Ладоги.

Разработка и внедрение дистанционных методов изучения озер

Выдающийся вклад в развитие отечественной и мировой лимнологии внесла лаборатория дистанционных методов ИНОЗ АН СССР, которую в 1982 г. возглавил академик К.Я. Кондратьев, он же был одним из основателей в 1992 г. Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Ф. Нансена. В лаборатории ИНОЗ разрабатывались, внедрялись, совершенствовались новые методы дистанционного зондирования воды, оценки сплоченности

льда в СВЧ-диапазоне на основе многоканальных спектрально-поляризационных измерений и лидарных измерений, позволяющих дистанционно определять концентрацию хлорофилла-*a* и другие параметры качества воды в разных типах водоемов; эти методы получили мировую известность. Проведены международные эксперименты в рамках программы “Интеркосмос”, организованы крупные многоуровневые эксперименты с использованием спутников, самолетов-лабораторий, вертолетов, наземных и судовых наблюдений на озерах Ладожском, Онежском, Севан, Рыбинском водохранилище и др. Дистанционными методами показано возможное влияние строительства защитных сооружений г. Ленинграда от наводнений (“дамбы”) на экосистему Невской губы. За выдающиеся исследования оптических свойств вод крупных озер в 1992 г. вместе с профессором Д.В. Поздняковым и двумя канадскими учеными К.Я. Кондратьев был награжден престижной премией Чендлера-Мизенера, присуждаемой Международной ассоциацией исследований Великих озер. Впервые в России в ИНОЗ опубликованы монографии, обобщающие разработки новых подходов к использованию дистанционных методов в лимнологии [40, 121].

Разработка и применение математических моделей экосистем озер

Крупным достижением озероведов АН СССР была созданная в конце 1960-х гг. В.В. Меншуткиным одна из первых в мире математических моделей экосистемы оз. Дальнего (Камчатка) с использованием уникального ряда непрерывных круглогодичных измерений метео-, гидрологических, химико-биологических параметров и ихтиофауны озера за 40 лет [43]. За эту работу в 1971 г. авторы — Ф.В. Крогиус, Е.М. Крохин, В.В. Меншуткин — были удостоены Государственной премии СССР.

В результате международного сотрудничества между ИНОЗ, ИВПС КарНЦ РАН, Службой погоды Германии и Институтом водной экологии и внутреннего рыбоводства была создана модель Flake для пресноводных озер, которая дает возможность прогнозировать вертикальную структуру температуры и условия перемешивания в

озерах [112]. В настоящее время модель FLake используется в разных целях в 40 научных организациях во всем мире [123].

В 1980–2000 гг. в СПб ЭМИ РАН при тесном сотрудничестве ИНОЗ РАН, ИВПС КарНЦ РАН был создан комплекс трехмерных моделей термогидродинамики (ТГД) и экосистем Ладожского, Онежского озер [5, 52, 126]. Разработки позволили воспроизвести процесс антропогенного эвтрофирования Ладожского и Онежского озер, определить его ассимиляционный потенциал (АП) и предельно допустимые значения поступления фосфора извне для того, чтобы сохранить трофический статус озер. Для диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер в 2015–2022 гг. было разработано и/или адаптировано несколько новых моделей экосистем разной сложности и выполнены численные эксперименты с целью долгосрочного прогнозирования экосистем [24, 28, 126]. Эти разработки проведены совместно сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН, ИВП РАН, СПб ИО РАН, ИВМ РАН и ИНОЗ РАН и опубликованы в коллективных монографиях [24, 124]. 3D-модель ТГД, первоначально разработанная Р.А. Ибраевым для Каспия, была адаптирована для Ладожского и Онежского озер и сопряжена со специальным модулем для расчета первичной продукции фитопланктона [24] в виде одномерной модели FLakeEco [113] и успешно применялась для разнотипных озер, расположенных в различных географических зонах [112]. В 2019–2022 гг. для Ладожского и Онежского озер были разработаны более совершенные, чем ранее, математические имитационные модели экосистем, которые описывают гидрологические, гидрохимические и гидробиологические процессы в виде биогеохимического круговорота вещества, происходящие как в водной среде, так и в донных отложениях. По сути, был разработан реанализ для экосистемы оз. Онежского [126].

Разработка моделей водосборов озер

В ИНОЗ под руководством С.А. Кондратьева разработан наиболее востребованный в России комплекс моделей диагностирования состояния озера и прогнозирования сезонных и многолетних изменений водосбора, который по-

звolyет оценивать изменения водного стока и биогенной нагрузки при различных сценариях хозяйственной деятельности и изменения климата [42]. Модель биогенной нагрузки ILLM (Institute of Limnology Load Model) разработана в ИНОЗ и предназначена для расчета внешней нагрузки общим азотом и общим фосфором на водные объекты со стороны водосбора. С помощью математического моделирования выполнена оценка возможного снижения биогенной нагрузки и выноса азота и фосфора в оз. Онежское за счет внедрения НДТ ведения сельскохозяйственного производства. В работе С.А. Кондратьева и М.В. Шаковой [42] представлены важные с практической точки зрения результаты; 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.

Открытие и исследования озера Антарктиды

Открытие в Антарктиде подледного оз. Восток, расположенного в районе Советской (Российской) станции Восток, полученные научные результаты — выдающиеся достижения не только российской, но и мировой науки второй половины XX в. В бурении, исследовании ледовых кернов, открытии озера принимали участие многие организации: ААНИИ, СПб Государственный Горный университет, ПИЯФ РАН, Институт географии АН, МГУ им. Ломоносова, и др. Академик В.М. Котляков оценил открытие и результаты исследований оз. Восток как “Последнее географическое открытие глобального масштаба” [40]. В 1961 г. И.А. Зотиковым (впоследствии — чл.-корр. РАН) проведены теплофизические расчеты, которые позволили ему сделать обоснование возможного существования подледниковых озера Антарктиды и неизвестных форм жизни в них [34]. Результаты сейсмического зондирования ледникового щита под станцией Восток, выполненного в 1959 и 1964 гг. под руководством чл.-корр. АН СССР А.П. Капицы [118], определили его толщину. Существование подледного озера было окончательно доказано,

когда в 1998 г. скважиной достигли толщи озерного льда, образованного из воды оз. Восток [50]. В результате исследований в 2008 г. были определены основные характеристики подледникового озера, расположенного в ложбине коренных пород с площадью водного зеркала 15.79 тыс. км². Объем воды ~6000 км³. Полученные керны льда на станции Восток позволили реконструировать климат и газовый состав атмосферы за более чем 410 тыс. лет [40]. Водная среда озера ультраолиготрофная, не содержит питательных веществ, необходимых для развития жизни, хотя потенциально в озере могут существовать микроорганизмы, бактерии такого рода в озерном льду не обнаружены. Исследование самого озера, керны льда над ним представляет интерес с точки зрения геологической истории озера, уникальных физико-химических свойств реликтовой воды и донных отложений, условий зарождения и обитания живых микроорганизмов в экстремальной хемотрофной среде. Имеется план мероприятий по реализации Стратегии развития деятельности РФ в Антарктике до 2030 г., который предусматривает проведение “Комплексных исследований подледникового озера Восток” [51].

Кроме оз. Восток организациями ИВПС КарНЦ РАН и ЛИН СО РАН изучались другие небольшие озера Антарктиды. В 2010–2011 гг. ИВПС КарНЦ РАН во время проведения 56-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) для выявления общих глобальных и региональных особенностей климата и других факторов, влияющих на экосистемы озера Антарктиды, были выполнены комплексные исследования 27 озера Восточной Антарктиды в районах Российских станций Молодежной, Новолазаревской и Прогресс и разнотипных озера Восточной Фенноскандии [98]. Показано, что гидрологические свойства (прозрачность льда, постоянный ледяной покров) озера Восточной Антарктиды обеспечивали условия для развития цианобактериальных матов и мха на дне озера, но при потеплении климата в регионе, когда озера стали освобождаться ото льда, устанавливается вертикальная изотермия с температурой воды на ~3°C ниже по сравнению с озерами, покрытыми льдом. Таким образом, при потеплении климата здесь отмечается не увеличение, а снижение

биологической активности организмов. В этом в настоящее время проявляется отличие озер Восточной Антарктиды от озер Восточной Фенноскандии [98]. Исследования подледниковых водных сред Антарктиды определено Научным комитетом по антарктическим исследованиям в качестве одного из ведущих направлений исследований в начале XXI в.

Комплексные атласы и справочники крупнейших озер России

Среди важнейших достижений Академии наук второй половине XX — начале XXI вв. отметим создание комплексных атласов крупнейших озер России и их водосборов. В 1993 г. под редакцией Г.В. Галазия издан комплексный атлас оз. Байкал [7]. В 2005 г. издан популярный атлас “Озеро Байкал. Прошлое. Настоящее. Будущее” [58]. В 2009 г. издан энциклопедический справочник “Байкал: Природа и люди” под редакцией А.К. Тулохонова [8]. В 2015 г. институтами СО РАН, а также Иркутским государственным университетом и Институтом географии и геоэкологии АН Монголии издан “Экологический Атлас бассейна озера Байкал” [101]. В 2019 г. в МГУ им. Ломоносова издан Эколого-географический атлас-монография “Селенга-Байкал” под редакцией Н.С. Касимова [102]. По результатам многолетних исследований крупнейших озер Европы — Ладожского и Онежского — изданы комплексные атласы этих озер. В ИНОЗ РАН в 2002 и 2015 гг. под редакцией академика В.А. Румянцева изданы два комплексных атласа оз. Ладожского [6, 47]. В 2010 г. Коллективом ИВПС КарНЦ РАН под редакцией Н.Н. Филатова издан атлас оз. Онежского [62]. Достижением РАН является участие в издании ряда энциклопедий, посвященных озерам и водохранилищам России и мира. В 2012 г. специалистами ИВП, ИНОЗ РАН, МГУ им. Ломоносова издана энциклопедия “Реки и озера мира” [69] под редакцией В.И. Данилова-Данильяна. В 2012 г. в издательстве “Springer” опубликована Энциклопедия об озерах и водохранилищах мира, авторами статей об озерах России были российские ученые [109, 110, 125]. В этой энциклопедии даны сведения об озерах, классификации озер и озерных регионов России, представлены комплексные

сведения о современном состоянии и изменениях экосистем Ладожского и Онежского озер. Крупное достижение Академии наук — издание в 1987–1998 гг. серии монографий в восьми томах под общим названием “История озер СССР” (например, [37]). Главным редактором серии был А.Ф.Трешников — директор ИНОЗ АН СССР [37, 104]. В первой четверти XX в. в ИНОЗ РАН В.А. Румянцевым, В.Г. Драбковой и А.В. Измайловой была обобщена многоплановая лимнологическая информация об озерах России. Оценено состояние озерного фонда современной России, даны его количественная оценка и оценка качества вод озерных экосистем, расположенных в разных природных условиях России: “Озера европейской части России” [73] и “Озера азиатской части России” [74]. В этих монографиях показана современная лимнологическая изученность территории страны, приведены данные по запасам озерных вод в ее регионах, анализируются процессы под влиянием природных и антропогенных факторов в озерах в разных физико-географических условиях. К несомненным достижениям можно отнести то, что в монографиях проведен анализ изменений озерного фонда в масштабах страны на протяжении XX — начала XXI вв. и их основных причин.

Совершенствование законодательства для сохранения озер

Крупнейшие (великие) озера России и Евразии (Байкал, Каспий, Ладожское, Онежское, Телецкое) имеют стратегическое значение для развития экономики регионов России и ряда других стран, которые расположены на территориях водосборов этих озер. Поскольку существующие законодательные акты не позволяют в полной мере сохранить экосистемы озер, целесообразно установить дополнительные государственные меры, предусматривающие особый природоохранный статус данных объектов, а также особые условия осуществления хозяйственной деятельности. Но современное состояние озер свидетельствует о необходимости незамедлительных мер сохранения ресурсов, восстановления их экосистем. Обеспечение населения водой высокого качества для сохранения здоровья населения — проблемы,

которые находятся в сфере интересов национальной безопасности. В 1999 г. был принят Федеральный закон “Об охране озера Байкал”, в научном обосновании которого принимали участие организации РАН [90]. В ИНОЗ РАН разработаны концепция и проект Федерального закона об охране Ладожского озера [72]. В октябре 2014 г. Законодательным собранием Республики Карелии при участии законодательных собраний Санкт-Петербурга и Ленинградской области был разработан проект ФЗ РФ об охране Ладожского и Онежского озер. Необходимо принять меры по охране ресурсов Ладожского и Онежского озер в связи с тем, что эти озера – стратегические водные источники для всего Северо-Западного региона, поэтому сохранение их ресурсов важно для обеспечения национальной безопасности Российской Федерации [78]. В Указе Президента РФ В.В. Путина “О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года” Правительству Российской Федерации при разработке национального проекта в сфере экологии поручено исходить из того, что среди прочих проблем необходимо обеспечить решение задач по сохранению уникальных водных объектов, в том числе оз. Байкал, а также выполнить ряд мероприятий по берегам и прибрежной акватории озер Байкал, Телецкого, Ладожского, Онежского и рек Волги, Дон, Оби, Енисей, Амур, Урал, Печоры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований озер России Академией наук внесли выдающийся вклад в естествознание, в фундаментальные исследования, в решение практических задач экономики России. Полученные результаты значимы для разрешения проблем гидрологии вод суши, эволюции ее биосферы. Ресурсы озер активно используются многочисленными пользователями (промышленностью и сельскохозяйственными предприятиями, водным транспортом, гидроэнергетикой, для сброса сточных вод, рекреационной деятельности, аквахозяйствами). Озероведение в России развивается как междисциплинарная наука, изучающая озера в единстве с их водосборами, в том числе и как социо-эколого-экономические системы. Задача современного озероведения –

совершенствование теории динамики экосистем озер, способной к практическому прогнозированию не только в обычных, но и в экстремальных климатических и техногенных условиях.

Авторы благодарят рецензента за очень полезные, конструктивные предложения, которые позволили структурировать работу и улучшить ее восприятие; директора ЛИН СО РАН А.П. Федотова за помощь при подготовке статьи и директора ИВЭП СО РАН А.Т. Зиновьева за рекомендации, которые они предоставили авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аладин Н.В., Чуда Т., Крето Ж.Ф. и др. Современные проблемы и возможное будущее Аральского моря // Уч. зап. РГГМУ. 2017. Т. 48. С. 41–54.
2. Андреев А.П. Ладожское озеро. Ч. 1, 2. СПб.: Тип. Мор. мин-ва в Гл. Адмиралтействе, 1875. II. 263. 135 с.
3. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой. М.; Л.: Наука, 1982. 304 с.
4. Анучин. Д.Н. Воды суши. Озера // Землеведение. Т. 2. 1896. С. 1–24.
5. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Под ред. Л.А. Руховца. СПб.: Наука, 2003. 361 с.
6. Атлас “Ладожское озеро” / Отв. ред. В.А. Румянцев. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. 128 с.
7. Байкал (атлас) / Под ред. Г.И. Галазий. М.: Роскартография, 1993. 73 с.
8. Байкал: природа и люди. Энциклопедический справочник. Байкальский институт природопользования СО РАН / Под ред. А.К. Тулохонова. Улан-Удэ: ЭКОС, Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 608 с.
9. Берг Л.С. Аральское море // Изв. Туркестанского отделения РГО. СПб.: Типография М.М. Стасюлевича, 1908. Т. 5. Вып. 9. 580 с.
10. Берг Л.С. Климат и жизнь. М.: Гос. изд-во, 1922. 196 с.
11. Берг Л.С. Очерк истории исследования озер России в гидрологическом отношении // Изв. Рос. гидрол. ин-та. № 5. 1923. 11 с.
12. Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран / Под ред. Е.Н. Павловского. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 467 с.
13. Биологическая продуктивность оз. Красного и условия ее формирования / Отв. ред. И.Н. Андроникова, К.А. Мокиевский. Л.: Наука, 1976. 207 с.

14. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 308 с.
15. Васильев О.Ф., Савкин В.М., Сапрыкина Я.В. Анализ колебаний уровня озера Чаны // ДАН. 2006. Т. 407. № 4. С. 533–536.
16. Васильев О.Ф., Селегей В.В., Кириллов В.В. Озеро Телецкое – особенности лимнологической системы: история и перспективы исследований. Иркутск, 1994. Т. 6. 50 с.
17. Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс оз. Байкал. М.; Л.: Наука, 1965. 373 с.
18. Верещагин Г.Ю. Байкал. Научно-популярный очерк / Под ред. Д.Н. Талиева. М.: 1949. 228 с.
19. Верещагин Г.Ю. Лимнология и пути ее современного развития / Исследования озер СССР. 1932. Т. 1. С. 5–19.
20. Винберг Г.Г. Продукционно-биологические исследования экосистем пресных вод. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1973. 208 с.
21. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада лтд., 2016. 378 с.
22. Гидробиология озер Воже и Лача в связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг / Под ред. И.М. Распопова. Л.: Наука, 1978. 275 с.
23. Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Наука, 1966. 323 с.
24. Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3-D модели гидродинамики внутреннего моря // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России. Петрозаводск, 2020. С. 166–196.
25. Гранин Н.Г. Окольцованный Байкал // Наука из первых рук. 2009. № 3. С. 22–23.
26. Грачев М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 156 с.
27. Григорьев С.В., Грицевская Г.Л. Каталог озер Карелии. АН СССР. Карел. фил. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. 239 с.
28. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
29. Домрачев П.Ф. К вопросу о классификации озер Северо-западного края. Петроград: Рос. гидрол. ин-т. 1922. 43 с.
30. Дробкова В.Г., Сорокин И.Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.
31. Жаков Л.А., Менишуткин В.В. Математическая модель озерного ихтиоценоза // Вопросы ихтиологии. Т. 14. Вып. 3. 1974. С. 387–395.
32. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И. Большое Аральское море в начале 21 века: Физика, Биология, Химия. М.: Наука, 2012. 232 с.
33. Зобков М.Б., Чубаренко И.П., Есюкова и др. Озера как аккумуляторы микропластика на его пути с суши в Мировой океан // Изв. РГО. Т. 153. № 4. 2021. С. 1–19. DOI:10.31857/S0869607121040054
34. Зотиков И.А. Антарктическое подледниковое озеро Восток. М.: Науч. мир, 2010. 138 с.
35. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Зырянов Д.В. Каньонные вихри. Приложение теории топографических вихрей к феномену ледовых колец Байкала // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 2. С. 132–141. DOI:10.31857/S0321059622020195
36. Ивлев В.С. Экспериментальная экология питания рыб. М.: Пищепромиздат, 1955. 252 с.
37. История озер СССР. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер / Под ред. А.Ф. Трешикова. Л.: Наука, 1986. 253 с.
38. Калесник С.В. О некоторых важных задачах современного озероведения // Вод. ресурсы. № 1. 1973. С. 36–42.
39. Книпович Н.М. Каспийское море и его промыслы. Берлин: ГИЗ РСФСР, 1923. 87 с.
40. Комплексный дистанционный мониторинг озер / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Наука, 1987. 288 с.
41. Котляков В.М., Липенков В.Я., Васильев Н.И. Глубокое бурение в Центральной Антарктиде и проникновение в подледное озеро Восток // Вестн. РАН. 2013. Т. 83. № 7. С. 591–605. DOI:10.7868/S0869587313070062
42. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
43. Крогиус Ф.В., Крохин Е.М., Менишуткин В.В. Сообщество пелагических рыб озера Дальнего. Опыт кибернетического моделирования. Л.: Наука, 1969. 86 с.
44. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Изд-во РИО КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

45. Кузнецов С.И. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.
46. Ладожское озеро. Современное состояние. Мониторинг. Проблемы управления Ладожским и другими озерами / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 508 с.
47. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: Атлас / Под ред. В.А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
48. Ладога / Под ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
49. Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцев, В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
50. Лозовик П.А. Устойчивость водных объектов к закислению в зависимости от их удельного водосбора на примере озер и рек бассейна р. Шуи (Онежской) // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 188–194.
51. Лукин В.В., Марков А.Н., Попов С.В. Открытие и изучение антарктического подледникового озера Восток. Памяти географа А.П. Капицы // Рациональное Природопользование: традиции и инновации. Материалы III Международ. конф. М., 2022. С. 44–48.
52. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер их использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. СПб.: Нестор-История, 2014. 118 с.
53. Менишуткин В.В., Кожова О.М., Ащепкова Л.Я., Кротова В.А. Камерная модель динамики экосистемы Байкала с учетом трехмерной циркуляции вод // Математическое моделирование водных систем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 288–298.
54. Методические аспекты лимнологического мониторинга // Отв. ред. И.С. Трифонова. Л.: Наука, 1988. 184 с.
55. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И. Закисление вод: уязвимость и критические нагрузки. М.: Наука, 2017. 400 с.
56. Николаев И.И. Очерк структуры и формирования годового лимнологического цикла водоемов умеренной зоны // Озера Карельского перешейка. Л.: Наука, 1971. С. 3–34.
57. Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) // Под ред. О.Ф. Васильева, Я. Вейн. Новосибирск: Гео, 2015. 255 с.
58. Озеро Байкал. Прошлое. Настоящее. Будущее. Атлас // М.: Роскартография, 2005. 122 с.
59. Озера Карелии: Справочник // Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
60. Озерецковский Н.Я. Путешествие академика Н. Озерецковского по озерам Ладожскому, Онежскому и вокруг Ильмени. Второе издание. СПб., 1812. 559 с.
61. Озеро Чаны. Гидрология, гидрохимия, гидробиология, орнитология (материалы к изучению) // Отв. ред. Н.И. Ермолаева, В.В. Кириллов. Новосибирск: ИВЭП СО РАН, 2007. 48 с.
62. Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
63. Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка / Под ред. И.Н. Андрониковой, К.А. Мокиевского. Л.: Наука, 1984. 298 с.
64. Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера / Под ред. В.Г. Дробковой, И.С. Трифоновой. Л.: Наука, 1989. 260 с.
65. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В. Оценка концентраций частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера // Регион. экология. 2018. № 4 (54). С. 48–52.
66. Проблема территориального перераспределения водных ресурсов / Под ред. Г.В. Воропаевой, Д.Я. Раткович. М.: АН СССР, 1985. 504 с.
67. Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Винокуров Ю.И., Кириллов В.В., Зиновьев А.Т. Современное состояние, экологические проблемы и перспективы изучения Телецкого озера (Республика Алтай) // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 137–144.
68. Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. Н.П. Смирновой, А.В. Шнитникова. Л.: Наука, 1982. 282 с.
69. Реки и озера мира. Энциклопедия / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: Энциклопедия, 2019. 927 с.
70. Россолимо Л.Л. Изменение лимнологических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 143 с.
71. Россолимо Л.Л. Температурный режим озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 551 с.
72. Румянцев В.А., Алхименко А.П., Кудерский Л.А., Соболев И.А. Концепция и проект Федерального закона “Об охране Ладожского озера”. СПб.: ИНОЗ РАН, ИПК “Прикладная экология”, 2008. 110 с.
73. Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Озера азиатской части России. СПб.: Свое изд-во, 2017. 480 с.
74. Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России: монография. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.

75. Румянцев В.А., Коронкевич Н.И., Измайлова А.В. и др. Водные ресурсы рек и водоемов России и антропогенные воздействия на них // Изв. РАН. Сер. географическая. М.: Наука, 2021. Т. 85. № 1. С. 120–135.
76. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Крюков Л.Н. Трансформация наноразмерных частиц и проблема их удаления при водоподготовке // ДАН. 2014. Т. 458. № 3. С. 349–353.
77. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А., Григорьев А.С. Стохастические модели влияния климата на гидрологию озер. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 2001. 156 с.
78. Румянцев В.А., Филатов Н.Н. К вопросу об охране Ладожского и Онежского озер. Что делать: принимать закон об охране озер или начать с реализации приоритетного проекта? // Вода/Magazine. 2018. № 10 (134). С. 39–42.
79. Русинек О.Т., Тахтеев В.В., Гладкочуб Д.П. и др. Байкаловедение. Кн. 1. Новосибирск: Наука. 2012. 468 с.
80. Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Озера и климат: Модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы: учебное пособие / Под ред. В.П. Дымникова, В.Н. Лыковского, Е.П. Гордова. Томск: Изд. дом ТГУ, 2014. Гл. 10. С. 256–326.
81. Семенович Н.И. Лимнологические условия накопления железистых осадков в озерах // Тр. Лаб. озероведения АН СССР. 1958. Т. 6. С. 1–188.
82. Синюкович В.Н., Чернышов М.С. Особенности многолетней изменчивости притока поверхностных вод в озеро Байкал // Метеорология и гидрология. № 10. 2019. С. 30–39.
83. Скоринов А.С. Зоологические исследования Ладожской воды как питьевой // Ладожское озеро как источник водоснабжения. СПб., 1911. С. 587–709.
84. Смирнова Н.П., Исаченко А.Г., Андроникова И.Н. Теоретические вопросы классификации озер // СПб.: Наука, 1993. 192 с.
85. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. М.: РАН, 2021. 640 с.
86. Тахтеев В.В., Русинек О.Т. Выдающийся Исследователь Байкала // Вестн. РАН. 2019. Т. 89. № 10. С. 1062–1071. DOI:10.31857/S0869-587389101062-1071
87. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А., Томбер И.В. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Ktz (*Chlorophyta*) в прибрежной зоне Южного Байкала // Гидробиол. журн. 2014. Т. 10 (5). С. 15–26.
88. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
89. Трифонова И.С. Основные этапы развития лимнологии в России до середины XX века // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 115–125. DOI:10.17076/lim746
90. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.
91. Трифонова И.С., Сорокин И.Н. История становления отечественной лимнологии и ее основоположники // 70 Лет Институту озероведения РАН / Под ред. В.А. Румянцева, И.С. Трифоновой. СПб.: Свое изд-во. 2017. С. 8–14.
92. Федеральный закон “Об охране озера Байкал” от 1 мая 1999 г. № 94-ФЗ (с изменениями и дополнениями) // Собрание законодательства РФ. 1999. № 18. С. 220.
93. Федотов А.П., М. де Батист, Паулс Т. Тектоническая эволюция юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // ДАН. 2006. Т. 410. № 4. С. 503–505.
94. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера / Под ред. В. Селегей, Б. Дехандсхюттер, Я. Клеркс, Е. Высоцкого. Королевский музей Центральной Африки (Бельгия). Ann. Sc. 2001. Т. 105. 310 с.
95. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 191 с.
96. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гдрометиздат, 1984. 161 с.
97. Филатов Н.Н. Термогидродинамика и экосистемы великих озер России: диагноз и прогноз // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 8–20.
98. Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // ДАН. 2012. Т. 444. № 5. С. 554–557.
99. Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. Температурная стратификация и механизмы конвекции в озере Байкал // ДАН. 1991. Т. 321. № 2. С. 831–835.
100. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука, 1968. 246 с.

101. Эвтрофирование мезотрофного озера по материалам многолетних наблюдений на оз. Красном / Под ред. И.Н. Андрониковой. Л., 1980. 245 с.
102. Эколого-географический атлас-монография “Селенга-Байкал” // Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Московского ун-та, 2019. 288 с.
103. Экологический атлас бассейна озера Байкал / Под ред. А.Р. Батуева, Л.М. Корытного, Ж. Оюунгэрэл, Д. Энхтайван. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. 145 с.
104. Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследования Российско-армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения). Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. 348 с.
105. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Под ред. З.С. Кауфмана. Л.: Наука, 1990. 264 с.
106. 70 лет Институту озероведения РАН / Под ред. В.А. Румянцев, И.С. Трифионовой. СПб.: Свое изд-во, 2017. 252 с.
107. Ecology of Meromictic Lakes / Eds R.D. Gulati, E.S. Zadereev, A.G. Degermendzhi. Ecological Studies. 2017. V. 228. 405 p.
DOI:10.1007/978-3-319-49143-1_2
108. Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // J. Inland Waters, V. 9. № 2. 2019. P. 130–141. DOI:10.1080/20442041.2018.1533355
109. Filatov N.N., Gronskaya T.D. Russian Lakes // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Eds Lars Bengtsson, Reginald W. Herschy, Rhodes W. Fairbridge. Dordrecht: Springer, 2012. P. 674–679.
110. Filatov N., Rukhovets L.A. Lakes Ladoga and Onego // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Eds Lars Bengtsson, Reginald W. Herschy, Rhodes W. Fairbridge. Dordrecht: Springer, 2012. P. 429–432.
111. Frey D.G. Limnology in the Soviet Union // J. Limnol. Oceanog. Indiana Univ. 1964. 29 p.
112. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus. A. 2012. 64. DOI:0.3402/tellusa.v64i0.17264
<http://www.lakemodel.net>
(дата обращения: 01.03.2024)
<http://www.lin.irk.ru> (дата обращения: 11.02.2024)
113. Izhitskiy A., Zavialov P., Sapozhnikov P. et al. Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // Sci. Rep. 2016. V. 6. 23906.
114. Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 2016. V. 42. P. 6.
DOI:10.1016/j.jglr.2015.11.006
115. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // J. Great Lakes Res. 2020. V. 46. Iss. 4. P. 850–861.
116. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. 1996. V. 381. № 6584. P. 684–686.
117. Karetnikov S., Leppäranta M., Montonen A. Time series of over 100 years of ice seasons on Lake Ladoga // J. Great Lakes Res. 2017. V. 43. Iss. 6. P. 979–988.
DOI:10.1016/j.jglr.2017.08.010
118. Khodzher T.V., Domysheva et al. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // Limnol. Freshwater Biol. 2018. 1. P. 2–9.
DOI:10.31951/2658-3518-2018-A-1-2
119. Kondratyev K.Ya., Filatov N.N. Limnology and Remote sensing. A Contemporary approach. London: Springer-Praxis, 1999. 412 p.
120. Kouraev A.V., Zakharova E.A., Kostianoy A.G., Shimarayev M.N., Desinov L.V., Petrov E.A., Hall N.M. J., Rémy F., Suknev A.Ya. Giant ice rings in southern Baikal: multi-satellite data help to study ice cover dynamics and eddies under ice // The Cryosphere. 2021. V. 15. № 9. P. 4501–4516.
DOI:10.5194/tc-15-4501-2021
121. Mironov D., Heise E., Ritter B., Kourzeneva E., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. V. 15. P. 218–230.
122. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling // Springer Praxis. 2010. 302 p.
123. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Izmaylova A.V. Russian Lakes, Geographical Classification // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Eds Lars Bengtsson, Reginald W. Herschy, Rhodes W. Fairbridge. Dordrecht: Springer, 2012. P. 679–691.
124. Savchuk O.P., Isaev A.V., Filatov N.N. Three-Dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in lake Onego ecosystem, 1985–2015. Pt II. Seasonal Dynamics and Spatial Features;

- Integral Fluxes // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. V. 15. № 2. P. 98–109.
DOI:10.48612/fpg/9mg5-run6–4zr8
125. *Shimaraev M.N., Sinyukovich V.N., Sizova L.N., Troitskaya E.S.* Heat balance of Lake Baikal and the relationship of its ice-thermal and water regime with global atmospheric circulation in the Northern Hemisphere during the modern period // *Limnol. Freshwater Biol.* 2018. V. 1. P. 10–14.
DOI:10.31951/2658-3518-2018-A-1-10
126. *Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V. et al.* Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger // *J. Great Lakes Res.* 2016. № 42. P. 487–497.
127. *Tomkeieff S.I.* Limnology In The U.S.S.R // *Nature.* 1946. № 3982. February 23. 239 p.
DOI:10.1038/157239a0