

Труды

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 4, 2011

transactions.krc.karelia.ru

ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	3
Н. Н. Филатов. АКТУАЛЬНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ	4
А. В. Литвиненко, М. С. Богданова, В. А. Карпечко, И. А. Литвинова, Н. Н. Филатов. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КАРЕЛИИ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ	12
П. А. Лозовик, А. В. Рыжаков, А. В. Сабылина. ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ, КРУГОВОРОТА И ОБРАЗОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ	21
Н. М. Калинин, Т. А. Чекрыжева, Т. П. Куликова, А. В. Рябинкин. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ БИОТЫ ВОДОЕМОВ КАРЕЛИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИОННОГО СОСТАВА ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА	29
Н. А. Белкина. РОЛЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ	35
Т. М. Тимакова, А. В. Сабылина, Т. Н. Полякова, М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т. А. Чекрыжева. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ	42



ТРУДЫ КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН. № 4, 2011

Е. В. Теканова, П. А. Лозовик, Н. М. Калинин, Т. П. Куликова, Т. Н. Полякова, А. В. Рябинкин, Ю. Л. Сластина, Т. М. Тимакова, Т. А. Чекрыжева. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА	50
Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова, Н. И. Пальшин, А. Ю. Тержевик. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО И КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМОВ МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА ЗИМОЙ	57
З. С. Кауфман. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФАУНЫ ОНЕЖСКОГО И ЛАДОЖСКОГО ОЗЕР (краткий обзор)	64
Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОХРАНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА	77
В. В. Меншуткин. ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ И ОЗЕРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ	88
Н. Е. Кулакова, П. А. Лозовик. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ РУДЫ КОСТОМУКШСКОГО И КОРПАНГСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	98
И. М. Нестеренко, С. Л. Матвеев. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОЗАПАСОВ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТАХ КАРЕЛИИ: ИНЖЕНЕРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ	103
Г. С. Бородулина. РОЛЬ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕР БАСЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА	108
О. Я. Глибко, А. А. Лукин, Б. Ф. Прищепа. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЫБОЛОВСТВА	116
А. В. Литвиненко, М. С. Богданова. РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ»	124
Л. Е. Назарова. ОБ ОЦЕНКЕ КОМФОРТНОСТИ КЛИМАТА КАРЕЛИИ	129
Краткие сообщения	
И. Ю. Потапова. РОЛЬ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КАРЕЛИИ	134
Ю. Л. Сластина, С. Ф. Комулайнен, М. С. Потахин, М. А. Ключкова. СТРУКТУРА КРИОФИТОНА В ОЗЕРАХ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА	138
Экспедиции	
А. В. Толстикова, А. Н. Шаров. Исследование озер Восточной Антарктиды	142
М. С. Богданова, И. Ю. Георгиевский, С. П. Гриппа, В. Л. Дмитриев, Н. В. Лобанова, П. В. Медведев, М. С. Потахин, С. Б. Потахин, А. В. Толстикова, Н. Н. Филатов. Экспедиция «Историко-географические памятники Европейского Севера России»	143
Юбилей и даты	
Н. Н. Филатов, М. Т. Сярки. Залман Самуилович Кауфман (к 90-летию со дня рождения)	144
Рецензии и библиография	147
Правила для авторов	152

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ
КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРА
И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Петрозаводск
2011

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 4. 2011. ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Главный редактор журнала
А. Ф. Титов

Редакционный совет

А. М. Асхабов, В. Т. Вдовицын, Т. Вихавайнен, А. В. Воронин, С. П. Гриппа, Э. В. Ивантер, А. С. Исаев, В. Т. Калинин, В. И. Крутов, А. М. Крышень (зам. главного редактора), Е. В. Кудряшова, В. В. Мазалов, Ф. П. Митрофанов, И. И. Муллонен, Н. Н. Немова, В. В. Окрепилов, О. Н. Пугачев, Ю. В. Савельев, Н. Н. Филатов, А. И. Шишкин, В. В. Щипцов, [Ф. Н. Юдахин](#)

Editor-in-Chief
A. F. Titov

Editorial Council

A. M. Askhabov, V. T. Vdovitsyn, T. Vihavainen, A. V. Voronin, S. P. Grippa, E. V. Ivanter, A. S. Isaev, V. T. Kalinnikov, V. I. Krutov, A. M. Kryshen' (associate editor), E. V. Kudryashova, V. V. Mazalov, F. P. Mitrofanov, I. I. Mullonen, N. N. Nemova, V. V. Okrepilov, O. N. Pugachyov, Yu. V. Saveliev, N. N. Filatov, A. I. Shishkin, V. V. Schiptsov, [F. N. Yudakhin](#)

Редакционная коллегия выпуска

Н. Н. Филатов (отв. ред.), В. И. Кухарев, Т. И. Рegerанд

Editorial board of the volume

N. N. Filatov (Editor-in-Charge), V. I. Kukharev, T. I. Regerand

ISSN 1997-3217

Зав. редакцией Н. В. Михайлова
Адрес редакции: 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
тел. (8-8142)780109; (8-8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Электронная полнотекстовая версия: transactions.krc.karelia.ru

**Выпуск посвящен 20-летию создания
Института водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН**

ОТ РЕДАКТОРА

Представляем Вашему вниманию тематический выпуск «Водные проблемы Севера и пути их решения», приуроченный к 20-летию создания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. В нем рассмотрены такие актуальные и перспективные проблемы, как разработка методов определения критических антропогенных нагрузок на пресноводную гидросферу; критериев и технологий оценки геоэкологического состояния водоемов (Ладожское и Онежское озера, Сямозеро, Водлозеро и др.). Представлены исследования процессов антропогенного эвтрофирования, закисления поверхностных и подземных вод. Показаны проблемы влияния промышленности (горнодобывающей, ЦБП и др.) на водные системы и подходы по совершенствованию методов оценки качества вод, обоснования использования поверхностных и подземных вод для питьевого, рекреационного и рыбохозяйственного использования. Рассматриваются вопросы разработки новых методов управления водными ресурсами, оценки ассимиляционного потенциала и устойчивости водных систем к внешним воздействиям. Даны результаты исследования перераспределения влагозапасов в промерзающих почвогрунтах Карелии и пути решения инженерных и экологических задач. Представлены разработки по совершенствованию нормативной базы, законодательства для рационального использования и охраны ресурсов водоемов. Показаны особенности климата региона и оценивается его комфортность для проживания населения. Приводится информация о некоторых наиболее значимых экспедициях и публикациях ИВПС КарНЦ РАН.

*Ответственный редактор
чл.-корр. РАН, д. г. н. Н. Н. Филатов*

*Ознакомиться с требованиями к оформлению материалов можно на сайте журнала
transactions.krc.karelia.ru*

УДК 556 (470.2)

АКТУАЛЬНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Н. Н. Филатов

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Рассмотрены актуальные водные проблемы Европейского Севера России, в решении которых участвовал ИВПС КарНЦ РАН в последние 5 лет. Показаны перспективы дальнейшего решения фундаментальных и практических вопросов водохозяйственного комплекса региона.

Ключевые слова: водные ресурсы, модели, методы наблюдения, экспертные системы, совершенствование методов изучения, управления ресурсами.

N. N. Filatov. MODERN WATER PROBLEMS OF THE NORTH OF EUROPEAN RUSSIA

Current water problems of the North of European Russia were under consideration. The methods to deal with them are indicated. The most important tasks, methods developed by the Northern Water Problems Institute over the past 5 years are reported. Potential ways for further development of the basic and applied issues of the water sector in the region are presented.

Key words: water resources, models, observation techniques, expert systems, improvement of water management systems.

К вопросу о приоритетных направлениях развития наук о воде

Развитие наук о воде, включающих широкий спектр фундаментальных и прикладных вопросов, сталкивается с выбором так называемых приоритетных научных направлений, которые будут поддерживаться государством в будущем. Указанная проблема выбора приоритетов не имеет простого решения. Важно понять, какие из направлений (помимо информационных, инновационных, нанотехнологических и др.) будут относиться к числу «прорывных», насколько фундаментальные и прикладные исследования функционирования, рационального использования, охраны озерных и морских систем, проводимые сегодня организациями Академии наук, будут востребованы в будущем.

Важность и перспективность изучения водных систем, в том числе и с практической точки

зрения, может быть показана на примере исследований, проводимых Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН совместно со специалистами других институтов страны. Ряд направлений представлен в данном выпуске трудов КарНЦ РАН, другие, в том числе и перспективные, опубликованы в статьях и монографиях сотрудников и упомянуты также в настоящей статье.

Основные направления деятельности ИВПС КарНЦ РАН, утвержденные Президиумом РАН, включают выявление фундаментальных закономерностей функционирования озерно-речных и морских систем, прогнозирование их изменчивости под влиянием природных и антропогенных факторов, развитие научных основ управления водными ресурсами; оценку состояния водных ресурсов и водно-экологического потенциала территории, устойчивости водных объектов к антропогенным воздействи-

ям (целлюлозно-бумажной, металлургической и горнодобывающей промышленности, лесных вырубок, сельскохозяйственной и лесной мелиорации, объектов нефтяной и газовой промышленности) в условиях Европейского Севера России.

Состояние водных ресурсов как важный фактор социально-экономического развития Европейского Севера России

Как показывают исследования ИВПС КарНЦ РАН, водные ресурсы не лимитируют развития экономики региона [Водные ресурсы..., 2006], однако имеется целый ряд нерешенных проблем, связанных с необходимостью выявления фундаментальных закономерностей функционирования озерно-речных и морских систем, прогнозирования их изменчивости и совершенствования системы управления водными ресурсами, включая экономические механизмы водопользования и его безопасность, научного обоснования повышения надежности водообеспечения. Эти проблемы были отмечены как наиболее важные для совершенствования водохозяйственного комплекса России на всероссийской конференции «Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России», которая состоялась в 2010 г. в Краснодаре [Данилов-Данильян, 2010], а также в документе Правительства РФ [Водная стратегия Российской Федерации, 2009].

В последние годы дискутируется вопрос дальнейшего использования богатых водных ресурсов РФ. Рассматриваются возможности продажи вод в другие страны [Румянцев, 2009]. Обоснование неэффективности как продажи воды, так и перераспределения стока рек показано в работе [Данилов-Данильян, 2010], в которой доказывается, что экономически выгодным является не продажа водных ресурсов, а создание и реализация водоемкой продукции. Очевидно, что для каждого региона России водные проблемы должны решаться дифференцированно. В частности, Республика Карелия – один из самых обеспеченных водными ресурсами регионов – уже сейчас испытывает большую нагрузку на водные объекты от воздействия предприятий, выпускающих водоемкую продукцию (целлюлозно-бумажная промышленность, производство алюминия и железорудных окатышей, энергетика) [Состояние водных объектов..., 2007]. Выход из сложного положения с рациональным использованием и охраной водных ресурсов, обеспечением населения отдельных регионов и в целом РФ качественной питьевой водой

возможен при реализации конкретных взаимосвязанных мероприятий в рамках общенациональной программы действий, рассчитанной на достаточно долгий период, с участием государственных органов власти, местного самоуправления, водопользователей, науки, общественности, всех заинтересованных сторон. В 2009 г. в Республике Карелия при участии ИВПС КарНЦ РАН было подготовлено научное обоснование новой Концепции программы обеспечения населения РК чистой водой. При разработке концепции учитывались положения руководящего документа «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г.» [2009]. Выполненные ИВПС КарНЦ РАН работы позволили не только обеспечить ряд населенных пунктов Карелии чистой питьевой водой, но и создали информационную базу для комплексного решения проблемы обеспечения населения РК чистой водой. Накопленный опыт может быть полезен и для других регионов России [Водные ресурсы..., 2006].

Совершенствование водохозяйственного комплекса, картирование, инвентаризация, оценка состояния водных объектов ЕТР

В ИВПС КарНЦ РАН развиваются подходы по совершенствованию водохозяйственного комплекса, картированию, инвентаризации, оценке состояния водных объектов ЕТР, реализован ряд практических проектов по обеспечению населения питьевой водой высокого качества. В институте создана и внедрена в органы управления Республики Карелия специализированная геоинформационная система «Водные объекты на территории РК» как подсистема единой ГИС Республики Карелия, обеспечивающая формирование, ведение и представление тематической информации по водному фонду региона [см. ст. А. В. Литвиненко, М. С. Богдановой в наст. номере]. В ИВПС выполнены обобщения по разработке каталога озер и рек, атласа «Онежское озеро» [2010] и справочника «Озера Карелии» [2011], разработке современных баз и банков данных с их государственной регистрацией. Указанные разработки могут служить прототипом для создания подобных продуктов для организаций, принимающих решения в сфере водных отношений других регионов РФ. В ИВПС КарНЦ РАН выполнены разработки методов расчета изменений элементов водного баланса при мелиорации [см. ст. И. М. Нестеренко в наст. номере], лесохозяйственных и лесопромышленных работах [Карпечко, Бондарик, 2010].

Совершенствование методов оценки состояния и разработки систем поддержки принятия решений в сфере управления ресурсами водоемов

Практика ставит перед комплексом наук о воде (лимнологией, гидрологией, гидрогеологией, океанологией) задачу оптимального управления ресурсами, экологическими системами, для решения которой традиционные методы, которые использовались в XX в., сейчас оказываются недостаточными. Возрастает роль математического моделирования, без которого немислимо обоснование и решение практических задач сохранения, использования и управления ресурсами. При этом о состоянии управляемой экосистемы можно судить только по данным наблюдений, которые никогда не бывают полными и исчерпывающими, а отдельные величины вообще не поддаются непосредственному измерению [Филатов, Меншуткин, 2008]. Многие важные для понимания функционирования озерной экосистемы и прогнозирования ее поведения сведения обычно определяют на основе фундаментальных исследований, и в первую очередь с использованием моделей [Руховец и др., 2006; Меншуткин, 2010] и целенаправленных экспериментов [Лозовик, 2006; Состояние водных объектов..., 2007; Калинкина, Куликова, 2009].

В СПб ЭМИ РАН продолжают разработку логико-лингвистических моделей [см. ст. В. В. Меншуткина в наст. номере], а также «обобщающей модели озерной системы» с помощью когнитивных подходов. Смысл когнитивного подхода состоит в том, что моделируется не сам изучаемый объект, а то, как этот объект отображается в сознании людей, хорошо знающих и имеющих опыт в изучении данного объекта [Баксанский и др., 2010]. Озера Карелии представляются удобным объектом для опробования нового для лимнологии подхода – когнитивного моделирования – благодаря разнообразию их характеристик и хорошей изученности, наличию компьютерной базы данных и разработанной экспертной системы.

Цикл работ ИВПС КарНЦ РАН посвящен созданию экспертных систем (ЭС) с использованием теории искусственного интеллекта. В ряде статей [Филатов, Меншуткин, 2008; Меншуткин и др., 2009] представлены разработки ЭС для классификации малоизученных или неизученных озер, оценки их трофии. Создан блок экспертной системы для оценки ихтиоценозов. Для этого используются базы данных и базы знаний о наиболее распространенных рыбах Карелии и предлагается модель сообщества рыб, основанная на принципе трофической сети. Система позволяет

не только оценить ихтиомассы и возрастную структуру популяций, но и определить рациональные пути промыслового использования сообщества для получения максимального вылова и сохранения биологического разнообразия. Основной результат работы заключается в том, что продемонстрирована важность экосистемного подхода к определению оптимальных режимов промысла. Объектом эксплуатации должна быть не отдельная популяция промысловой рыбы, а все сообщество рыб данного водоема.

Модели, упомянутые выше, являются фрагментами экспертной системы по определению свойств и оптимизации использования природных ресурсов озер Карелии. При соединении с банком данных, созданным в ИВПС КарНЦ РАН [Озера Карелии, 2011], модели сообществ рыб, населяющих эти озера, представляют собой аппарат не только для уточнения, например, рыбной продуктивности данных водоемов, но и для построения планов их рационального хозяйственного использования.

Практика XXI в. спрашивает у специалистов-водников не как оценить, измерить биоразнообразие природных сообществ, а как его сохранить или изменить видовой состав в желаемом направлении; не как измерить продукцию популяций зоопланктона или промысловых рыб (что, конечно, само по себе очень интересно), а сколько и как следует ловить рыбу, чтобы при получении максимальных выловов не только не подорвать промысловые запасы, но и не нарушить всю экологическую систему водоема.

Совершенствование моделей экосистем возможно несколькими путями. При создании моделей водных объектов самым важным «...является разработанность концепции и доброкачественность исходных данных. Никакие самые совершенные вычислительные машины и методы прикладной математики не спасут положения, если наблюдения на водоеме велись бессистемно» [Меншуткин, 2010]. Таким образом, для изучения озерных систем сохраняет свою актуальность постановка направленных экспериментов на водоемах с использованием традиционных, классических подходов, а также с применением дистанционных методов, моделирования, современных разработок в области искусственного интеллекта, экспертных систем.

Оценка современного состояния и изменений экосистем разнообразных озер Севера и специализированные натурные эксперименты

Изучению современного состояния и изменений экосистем разнообразных озер Севера

были посвящены специализированные натурные эксперименты, выполненные за последние пять лет на Онежском озере, Выгозерском водохранилище и других озерах Севера. Ряд работ по этому направлению исследований ИВПС КарНЦ РАН представлены в настоящем издании. Выполняется большой цикл работ по изучению процессов трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах [см. ст. П. А. Лозовика и др. в наст. номере], особенностей реакции биоты на антропогенные воздействия [см. ст. Н. М. Калинкиной и др. в наст. номере], по оценке донных отложений [Белкина и др., 2008; см. ст. Н. А. Белкиной в наст. номере]. Актуальными являются вопросы оценки современного состояния, прогноза изменений водных систем (озер, озерно-речных систем, подземных вод, Белого моря) при климатических и антропогенных воздействиях. Важными остаются вопросы изменения водных систем при закислении, эвтрофировании и загрязнении токсическими веществами [см., например, Лозовик и др., 2007; Теканова, Тимакова, 2007]. С использованием методов лабораторного моделирования и анализа натуральных данных впервые определены кинетические характеристики круговорота соединений азота в природных водах, позволяющие количественно оценить интенсивность их трансформации в объектах гидросферы [Лозовик, 2006; см. ст. П. А. Лозовика и др. в наст. номере].

Оценка биоразнообразия, последствий биологических инвазий и биоресурсов водных экосистем Севера

Этим вопросам в ИВПС уделяется серьезное внимание [Биоресурсы..., 2008; Кухарев и др., 2008]. Совместно с ИБ КарНЦ РАН разработана и опубликована обобщающая сводка по альгофлоре водных экосистем Карелии, включающая систематический каталог (1092 таксона) и эколого-географические характеристики современных представителей водорослей 190 озер и 83 рек, как чистых, не затронутых хозяйственной деятельностью, так и подверженных основным для региона типам антропогенного воздействия. Актуальность данной сводки определяется необходимостью решения проблемы сохранения биоразнообразия альгофлоры северо-западного региона России [Комулайнен и др., 2006]. Важным является создание системы оценки и рационального использования биоресурсного потенциала водных объектов северо-запада России на основе изучения региональной специфики их структуры и функционирования [Биоресурсы..., 2008]. Большое

внимание уделяется исследованию водосборов Белого и Балтийского морей и влиянию хозяйственной деятельности на водные объекты.

Состояние и прогноз изменений экосистем крупнейших озер Европы

В ИВПС КарНЦ РАН уделяется большое внимание оценке состояния и прогнозу изменений экосистем крупнейших озер Европы – безальтернативных источников питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, многих городов и населенных пунктов Республики Карелия, Ленинградской области, важных источников биологических ресурсов, рекреации, водного транспорта, энергетики. По данным многолетних наблюдений и математического моделирования (совместно с сотрудниками СПб ЭМИ РАН и ИНОЗ РАН) выполнен анализ состояния и возможных изменений экосистем Ладожского и Онежского озер под влиянием изменений климата и антропогенной деятельности [Rukhovets, Filatov, 2010]. Обобщение результатов исследований формирования фауны Онежского и Ладожского озер представлено в работах З. С. Кауфмана [см. его ст. в наст. номере].

Вопросы правовых и экономических методов регулирования, сохранения, использования водных и биологических ресурсов водоемов

В последние десятилетия интерес к проблеме управления экологическими системами значительно возрос: от теоретических соображений исследователи начали переходить к вопросам оптимального управления конкретными природными водными объектами [Данилов-Данильян и др., 2010]. Для обоснования сохранения, управления водными и биологическими ресурсами необходимо вместе с правовыми и административными подходами использовать экономические методы регулирования. Правовым вопросам использования водных и биологических ресурсов водоемов Севера посвящены работы А. А. Лукина с коллегами [Лукин, Глибко, 2009; см. ст. О. Я. Глибко в наст. номере]. Для решения проблем регулирования экосистем, внедрения экономических механизмов были разработаны такие определяющие понятия, как экономическая оценка природных ресурсов, экономический ущерб от загрязнения природной среды, ассимиляционный потенциал. Этому вопросу посвящены работы коллективов СПб ЭМИ РАН и ИВПС КарНЦ РАН по

изучению ассимиляционного потенциала Ладожского и Онежского озер [Ruchovets, Filatov, 2010; см. ст. Л. А. Руховца, Н. Н. Филатова в наст. номере].

Учитывая приграничное положение Карелии с Европейским союзом, наличие многочисленных трансграничных водных объектов, важно продолжать развитие методов классификации, регулирования водных объектов с учетом законодательства ЕС и РФ.

Изменения и изменчивость климата в регионе и реакции водных объектов и водосборов на эти изменения

Важный цикл работ проводится институтом по изучению изменений климата в регионе и реакции водных объектов и водосборов на эти изменения [Филатов и др., 2007; Ruchovets, Filatov, 2010]. Рассматриваются вопросы комфортности климата региона для проживания населения [см. ст. Л. Е. Назаровой в наст. номере]. Этот вопрос имеет не просто научный интерес, но и практическое значение, например, для определения обоснованности так называемых «северных» льгот. До сих пор не решены остаются вопросы влияния климата и качества используемых вод на здоровье населения. Для этого необходима реализация программы специальных научных исследований, проводимых совместно с органами здравоохранения, Росгидромета и других организаций. Эта работа должна завершиться созданием медико-географического атласа и обоснованием рекомендаций для принятия практических мер по улучшению здоровья населения региона.

Исследования и разработки в области гидрофизики и гидродинамики

Немаловажна роль озер и для решения общих проблем современной геофизики. Как известно, крупные озера могут рассматриваться как модель океана, где легче, чем в океане, поставить некоторые эксперименты, например, для калибрации и верификации термогидродинамических моделей, разработки и внедрения новых спутниковых методов, исследования таких важных явлений, как апвеллинги, фронты, когерентные структуры, грибовидные образования, внутренние волны, в том числе и нелинейные, и др. В последние годы ИВПС в рамках международного проекта выполнил исследования нелинейных внутренних волн, результаты которых будут опубликованы в коллективной монографии в издательстве Springer в 2011 г. [Strongly nonlinear internal waves in lakes...]. От-

метим участие ИВПС во внедрении моделей оперативного мониторинга для Белого моря, разработанных в ИО РАН [Семенов, Булатов, 2010]. Эта система востребована для решения задач обороны, водного транспорта, гидрометеорологии, оценки распространения и трансформации нефтепродуктов при их разливах, прокладки коммуникаций, обоснования выбора районов для разведения марикультуры и ряда других задач.

Впервые в мировой лимнологической практике на основе многолетних экспериментальных исследований с использованием современного прецизионного оборудования получено количественное описание динамики вертикальной структуры температуры воды и содержания растворенного кислорода, а также потоков тепла из/в донные отложения в годовом цикле для мелководного озера [Terzhevik et al., 2009]. Разработанная одномерная модель динамики температуры воды и условий перемешивания в озерах «FLake» сейчас широко используется ведущими метеоцентрами Европы для улучшения численного прогноза погоды [Mironov et al., 2010].

Стратегические задачи комплекса наук о воде

Стратегическая задача комплекса наук о воде состоит в *создании теории динамики водных систем, способной к практическому прогнозированию не только в обычных, но и в экстремальных ситуациях* [Арктика. Интересы России. 2002; Веселов, Чуприян, 2011]. Сегодня уже мало изучать влияние человека на экосистемы, требуется переход к изучению взаимодействия человека и природы. Это породило необходимость разработки представлений о *социо-эколого-экономических системах*. Указанное направление получило развитие в ИВПС при разработке подходов к изучению Белого моря и его водосбора как социо-эколого-экономической системы как в рамках проектов ФЦП «Мировой океан» [Филатов и др., 2005], так и в рамках проектов ИНКО-Коперникус и ОНЗ РАН [White Sea, 2005; Филатов, Тержевик, 2007]. Белое море – единственное море, полностью находящееся в пределах Российской Федерации, – может быть своеобразным полигоном для отработки решений разнообразных фундаментальных и прикладных проблем, задач обороны, транспорта, энергетики, социально-экономического развития Севера, освоения ресурсов Арктики.

Системные исследования позволили оценить современные социально-экономические и экологические проблемы Беломорья и их дина-

мику при разном комплексе условий. Эта работа – лишь этап дальнейшего развития исследований социо-экономико-экологических систем Беломорья. Предложенная разработка – единственная на сегодняшний день функционирующая система для Беломорья, которая может использоваться в качестве основы для создания комплекса поддержки принятия решений, научного обоснования реализации практических мер по сохранению качества вод моря. Практическая реализация системы поддержки принятия управленческих решений, подобной системе «NEST» для Балтийского моря [Wulff et al., 2007], потребует, по всей видимости, создания новой комплексной ФЦП для Беломорья. Важнейшая задача такой программы – создание комплексного полигона (станции) на Белом море, где можно выполнять полноценные междисциплинарные исследования с привлечением необходимых средств и возможностей заинтересованных организаций, таких как РАН, Росгидромет, Минтранс, МЧС, Минобороны и др. В настоящее время ни одна из существующих на Белом море станций (баз, полигонов) не приспособлена для решения сложных, междисциплинарных проблем. Целевые установки новой федеральной программы должны быть направлены не только на разработку новейших технологий для создания системы поддержки принятия решений при освоении ресурсов Арктики, но и способствовать возрождению такого важного региона Севера России, как Беломорье [Филатов и др., 2011].

Отметим также такое направление работ ИВПС КарНЦ РАН, как участие в оценке возможных проблем для окружающей среды строительства Штокманского магистрального газоконденсатного трубопровода через Кольский полуостров и Карелию.

ИВПС КарНЦ РАН принимает участие в ряде крупных проектов, имеющих практическое и теоретическое значение, в частности, в изучении изменения состояния озер под влиянием климата в Антарктиде; международной экспертизе по изучению влияния городских стоков на прибрежную зону Гавайских островов [Бондур и др., 2007]; оценке влияния горнопромышленных комплексов района г. Костомукши, предприятий ЦБП и других производств на водные экосистемы [см. статьи Н. М. Калинкиной и др.; Н. Е. Кулаковой, П. А. Лозовика в наст. номере].

Достаточно большой интерес к разработкам ИВПС КарНЦ РАН совместно с другими организациями Академии наук подтверждается тем, что результаты исследований опубликованы (одна монография в печати) не только в России, но и в ведущих научных изданиях Мира, в

частности в пяти монографиях издательства «Springer-Praxis».

Перспективы решения проблем развития наук о воде

Отмечая определенные достижения в решении актуальных водных проблем Севера, заметим:

- к числу актуальных и перспективных относятся вопросы разработки методов определения критических антропогенных нагрузок на пресноводную гидросферу; критериев и технологий оценки геоэкологического состояния пресноводных и морских водоемов (Ладожское и Онежское озера, Сямозеро, Водлозеро и др., Белое море); выявление конфликтов природопользования для разработки региональных эколого-экономических механизмов управления в условиях Севера; анализ природных и социально-экономических ресурсов развития территориальных комплексов России на примере комплексов Севера ЕТР;

- необходимо усилить исследования по созданию социо-экономико-экологических моделей, которые все более востребованы для принятия управленческих решений;

- важным остается совершенствование методов оценки качества и поиска поверхностных и подземных вод для питьевого, рекреационного и рыбохозяйственного использования водоемов, для обоснования перспективного развития северных территорий РФ, выяснения механизмов эволюции физиологических функций и адаптации организма к изменяющимся условиям среды обитания и экстремальным воздействиям;

- необходимо продолжить совершенствование системы оперативной оценки состояния, мониторинга и экспресс-систем биоиндикации водных объектов с использованием аэрокосмических средств, информационных сетей для подготовки рекомендаций органам власти при принятии оперативных решений, в том числе в кризисных и чрезвычайных ситуациях;

- требуется обоснование перспектив развития марикультуры, морских водорослей и форелевых хозяйств на Белом море; необходима оценка ассимиляционного потенциала экосистем озер Карелии под влиянием многочисленных форелевых хозяйств (в Карелии сейчас выращивается около 80 % товарной форели России);

- несмотря на то что имеются серьезные разработки в области математического моделирования термогидродинамических процессов и явлений экосистем Белого моря, Ладожского и Онежского озер, до сих пор не созданы

модели, доступные для широкого круга пользователей, наподобие, например, Принстонской модели (POM). Имеющиеся в нашем распоряжении модели работают, как правило, «в руках» создателей. Представляется целесообразным объединить усилия ведущих организаций РАН для разработки таких инструментов и их внедрения для пользователей, решения практических задач оценки состояния, рационального использования и охраны водных экосистем;

– необходимо активизировать участие организаций РАН в области совершенствования законодательства для рационального использования и охраны водоемов, требуется не только выполнить научное обоснование, но и обеспечить практическое восстановление озер – проблема, которой в нашей стране не уделялось достаточно внимания;

– весьма актуальным представляется разработка научного обоснования, проектирования и строительства на Белом море и других арктических морях приливных станций, учитывая сложную проблему энергетики РФ.

Дальнейшее эффективное развитие науки в нашей стране, в том числе и в области наук о воде, возможно только при создании условий для привлечения молодежи в академический сектор науки. В определенной степени этому способствует создание при академических учреждениях научно-образовательных центров. Такой НОЦ «Водные объекты Карелии и методы их исследования», созданный в 2002 г., успешно функционирует [Водная среда..., 2010]. Однако, учитывая комплексный характер необходимых исследований с привлечением специалистов океанологов, гидрологов, гидрогеологов, гидрохимиков, которых готовят только в таких специализированных учебных заведениях, как РГГМУ, а также в Санкт-Петербургском и Московском университетах (перспективы подготовки которых в нашем регионе отсутствуют), можно утверждать, что меры по созданию условий для работы молодых ученых в РАН в настоящее время недостаточны.

Науки о воде являются комплексными, междисциплинарными, и для решения фундаментальных проблем необходимо тесное сотрудничество хорошо подготовленных специалистов, объединенных единой идеей и задачей, пусть даже работающих в разных организациях и разных странах. Такой подход реализуется в настоящее время и остается перспективным для ИВПС КарНЦ РАН.

Автор благодарит В. И. Кухареву и А. Ю. Терзевика за конструктивные предложения, которые позволили улучшить статью.

Литература

Арктика. Интересы России и международные условия их реализации. М.: Наука, 2002. 335 с.

Баксанский О. Е., Гнатик Е. Н., Кучер Е. Н. Естествознание. Современные когнитивные концепции. М., 2010. 224 с.

Белкина Н. А., Рыжаков А. В., Тимакова Т. М. Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера // *Водные ресурсы.* 2008. Т. 35, № 4. С. 472–481.

Биоресурсы Онежского озера / Отв. ред. В. И. Кухарев, А. А. Лукин. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2008. 272 с.

Бондур В. Г., Филатов Н. Н., Гребенюк Ю. В. и др. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // *Океанология.* 2007. Т. 47, № 6. С. 827–846.

Веселов И. А., Чуприян А. П. О мерах МЧС России по обеспечению реализации экономических и инфраструктурных проектов в Арктике и создание системы специализированных аварийно-спасательных центров // *Арктика. Экология и экономика.* 2011. № 1. С. 48–51.

Водная среда: обучение для устойчивого развития / Ред. кол.: Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 182 с.

Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2009. № 1235-р.

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркия и др. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. 263 с.

Данилов-Данильян В. И. Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России // *Материалы Всерос. конф. Краснодар.* М.: Наука, 2010. 219 с.

Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Эволюционная обусловленность реакции гидробионтов на изменение ионного состава воды (на примере пресноводного зоопланктона) // *Известия РАН. Серия биологическая.* 2009. № 2. С. 243–248.

Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 225 с.

Комулайнен С. Ф., Чекрыжева Т. А., Вислянская И. Г. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. 81 с.

Кухарев В. И., Полякова Т. Н., Рябинкин А. В. Распространение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Ampipoda, Crustacea) в Онежском озере // *Зоол. журн.* 2008. Т. 87, № 10. С. 1270–1273.

Лозовик П. А. Расчетно-аналитический метод оценки содержания и элементного состава органического вещества природных вод // *Журн. аналитической химии.* 2006. Т. 61, № 6. С. 592–597.

Лозовик П. А., Потапова И. Ю., Банцевич Т. В. Буферная емкость поверхностных вод как геохимиче-

ский фактор их устойчивости к закислению // Геохимия. 2007. № 9. С. 1022–1029.

Лукин А. А., Глибко О. Я. Оптимизация системы управления рыбным хозяйством на внутренних водоемах как способ сохранения водных биоресурсов // Рыбное хозяйство. 2009. № 4. С. 96–99.

Меншуткин В. В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб.: Карельский НЦ РАН, 2010. 417 с.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии»: Ординальные и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 2. С. 160–171.

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. 2011 (в печати).

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 151 с.

Румянцев В. А. Готова ли Россия к выходу на мировой рынок воды // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 4–13.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. и др. Онежское озеро сегодня и завтра: опыт математического моделирования // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева, Т. И. Регеранд, В. Х. Лифшица. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 127–153.

Семенов Е. В., Булатов М. Б. Анализ результатов работы оперативной модели гидрофизических полей Белого моря в июле-августе 2008 г. // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 3. С. 410–415.

Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Отв. ред. П. А. Лозовик, Т. П. Куликова, Н. Н. Мартынова. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 210 с.

Теканова Е. В., Тимакова Т. М. Оценка современного трофического состояния Онежского озера по первичной продукции фитопланктона // Гидробиол. журн. 2007. Т. 43, № 3. С. 90–94.

Филатов Н. Н., Меншуткин В. В. Разработка геоинформационной и экспертной систем для оценки водных и биологических ресурсов водных объектов

Карелии // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. № 4 (66). М., 2008. С. 1–18.

Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. (ред.). Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных воздействий. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 335 с.

Филатов Н. Н., Здравоненков Р. Э., Петров М. П. и др. Комплексные океанологические исследования Онежского залива Белого моря // Моря Севера России. Комплексные исследования Белого моря / Ред. Г. Г. Матишов. М.: ММБИ, 2005. С. 111–128.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Сало Ю. А. Региональный климат: возможные сценарии изменения климата Карелии. Похолодание или потепление? // Изв. РГО. 2007. Т. 139, вып. 3. С. 72–79.

Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Тержевик А. Ю. Беломорье – регион для решения актуальных проблем Арктики // Арктика. Экология и экономика. 2011. № 2.

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. 15. P. 218–230.

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds.). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modeling. Springer-Praxis Publishing, 2010. 320 p.

Strongly nonlinear internal waves in lakes: Generation, Transformation and meromixis / Hutter K., Filatov N. et al. Springer-Heidelberg (Germany), 2011 (in press).

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N. et al. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquat. Ecol. 2009. 43. DOI 10.1007/s10452-009-9288-x.

White Sea: Its Marine environment and Ecosystem dynamics influenced by global change / N. N. Filatov, D. Pozdnjakov, O. Johannessen et al. London: Springer-Praxis, 2005. 472 p.

Wulff F., Savchuk O., Sokolov A. et al. Management Options and Effects on a Marine Ecosystem: Assessing the Future of the Baltic // Ambio. 2007. Vol. 36, N 2–3. P. 243–249.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Филатов Николай Николаевич

директор ИВПС КарНЦ РАН, член-корр. РАН
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru
тел.: (8142) 576381; +7921 6292222

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru
tel.: (8142) 576381; +7921 6292222

УДК 556+628.1/.3 (470.22)

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КАРЕЛИИ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ

**А. В. Литвиненко, М. С. Богданова, В. А. Карпечко,
И. А. Литвинова, Н. Н. Филатов**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

В статье дана характеристика особенностей гидрографической сети Республики Карелия и ее влияния на характер развития водного хозяйства. Оценен водно-ресурсный потенциал региона (речной сток и воды озер и водохранилищ). Дан анализ современного состояния хозяйственного использования водных ресурсов и динамики водопотребления и водоотведения за период с 1970 по 2009 г. Сформулированы и проанализированы ключевые проблемы в сфере рационального использования и охраны водных ресурсов: антропогенное влияние на водные объекты, обеспечение населения качественной питьевой водой.

Ключевые слова: Республика Карелия, особенности гидрографической сети, водные ресурсы, водное хозяйство, водопотребление, водоотведение, водохозяйственные проблемы.

**A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova, V. A. Karpechko, I. A. Litvinova,
N. N. Filatov. WATER RESOURCES OF KARELIA: MAIN PROBLEMS OF
SUSTAINABLE USE AND PROTECTION**

The paper describes characteristic features of the Republic of Karelia hydrographic network and its impact on the water economy development. The water resource potential of the region (river runoff, and waters of lakes and reservoirs) was estimated. Current utilization of the water resources and the dynamics of water consumption and water discharge in the period from 1970 to 2009 were analyzed. The main problems of sustainable use and conservation of water resources: human impact on water bodies and high-quality drinking water supply to people, were formulated and analyzed.

Key words: Republic of Karelia, features of the hydrographic network, water resources, water economy, water use, water discharges, water problems.

Существенная роль водных ресурсов в развитии и размещении производительных сил, многообразие влияния водного хозяйства на окружающую среду, множество возникающих при этом экономических и водно-экологических проблем вызывает необходимость разработки научных основ рационального использования и охраны вод. Для достижения этой цели

в России разработан проект Концепции государственной политики устойчивого водопользования [1998], в котором сформулированы основные водные принципы:

- бассейновый подход;
- минимизация вредных воздействий на водные объекты;
- самофинансирование водного хозяйства;

– этапность, планомерность и обоснованность преобразований.

Большинство известных исследований, посвященных водным аспектам отношения человека и воды, относятся к территориям с низкой водообеспеченностью (Поволжье, Урал, Северный Кавказ и т. п.). Их актуальность не вызывает сомнения и определяется, в первую очередь, противоречиями, существующими между уровнем их социально-экономического развития (высокая плотность населения, широкое развитие орошаемого земледелия, концентрация водоемких промышленных производств) и возможностями обеспечения потребностей экономики в воде (относительно небольшой объем возобновляемых водных ресурсов, количественное и качественное их истощение, экологическое состояние водных объектов). Число же работ, относящихся к северным районам страны, отличающимся высокой водообеспеченностью, значительно меньше, хотя вопросы, связанные с развитием водного хозяйства, здесь не менее актуальны и серьезны. Они имеют свою специфику, обусловленную, с одной стороны, особенностями гидрографии, природного качества вод, способностями водных объектов к самоочищению, а с другой – отличиями в структуре народного хозяйства. Так, экономика Республики Карелия характеризуется значительно меньшим удельным весом сельского хозяйства (при отсутствии орошаемого земледелия), широким развитием лесного комплекса, горнодобывающих отраслей, осушительной мелиорации. В структуре водного хозяйства наряду с водопотребителями столь же существенное, а иногда и большее значение имеют водопользователи (осушительная мелиорация, водный транспорт, рыбное хозяйство, гидроэнергетика, рекреация) [Гершензон и др., 1988].

В гидрографическом отношении территория Карелии относится к бассейнам Белого и Балтийского морей. При этом на беломорскую часть приходится 57 % территории республики, на балтийскую – 43 (без учета акваторий Ладожского и Онежского озер). Специфика гидрографии региона определяется особенностями всего комплекса природных условий, в первую очередь геологического строения, рельефа и климата, а также географическим положением республики (рис. 1).

В Карелии сформировалась очень развитая гидрографическая сеть, сравнимая по своей уникальности только с территорией сопредельной Финляндии. Она представлена преимущественно либо небольшими реками, либо короткими протоками, которые соединяют многочисленные озера, образуя озерно-речные

системы. По современным данным, общее число рек (включая Карельский перешеек) составляет 26,7 тыс. Суммарная их протяженность – 83 тыс. км. Преобладают водотоки длиной менее 10 км. Их количество 25,3 тыс. (95 %), общая протяженность – 52,3 тыс. км (63 %) [Ресурсы..., 1965]. Только 30 рек имеют длину более 100 км и относятся к классу средних. Густота речной сети для региона составляет 0,53 км/км².

В средний по водности год сток рек Карелии составляет 57 км³. Непосредственно на ее территории формируется 49,7 км³ (так называемый местный сток). Остальные воды (13 %) поступают из сопредельных регионов (в основном из Финляндии и Архангельской области) (табл. 1). Около 55 % речного стока с территории республики поступает в Белое море, 25 % – в Онежское озеро и 20 % – в Ладожское [Литвиненко и др., 1998].

Таблица 1. Ресурсы речного стока, км³

Бассейн	Площадь, тыс. км ²	Средний годовой сток	Годовой сток различной обеспеченности, %			
			25	50	75	95
р. Кеми	27,7	8,37	9,66	8,48	7,19	5,16
р. Нижнего Выга	27,1	8,33	9,34	8,24	7,22	5,89
Белого моря	100	31,2	34,2	31,5	27,2	20,5
р. Шуи	10,3	3,09	3,56	2,99	2,51	1,95
р. Суны	7,67	2,36	2,71	2,22	1,85	1,54
р. Водлы	13,7	4,43	5,2	4,43	3,66	2,54
Онежского озера	43,9	14,1	16,3	13,9	11,6	8,74
Ладожского озера	32,6	11,7	13,5	11,7	9,89	7,29
Республики Карелия	176,5	57,0	65,4	57,0	48,6	36,4
В том числе:						
местный сток	155,9	49,7	57,0	49,7	42,4	31,8
приток	20,6	7,35	8,43	7,36	6,27	4,7

Основными структурными элементами гидрографической сети Карелии являются водоемы (озера и водохранилища), во многом определяющие специфику водных систем республики. На территории республики насчитывается 61,1 тыс. озер суммарной площадью около 18 тыс. км² [Гашева, 1965]. Кроме того, в пределах республики находится около 40 % акватории Ладожского и 80 % – Онежского озера, являющихся крупнейшими пресноводными водоемами Европы. Озерность территории составляет 12 %, а с учетом карельских частей Онего и Ладоги достигает 21 %, являясь одной из самых высоких в мире. Основное число озер имеет площадь менее 1 км². Более значительные размеры имеют только 1389 водоемов (чуть более 2 % от общего числа), из них лишь 20 превышают 100 км². В группе малых водоемов преобладают озера, не имеющие видимого стока

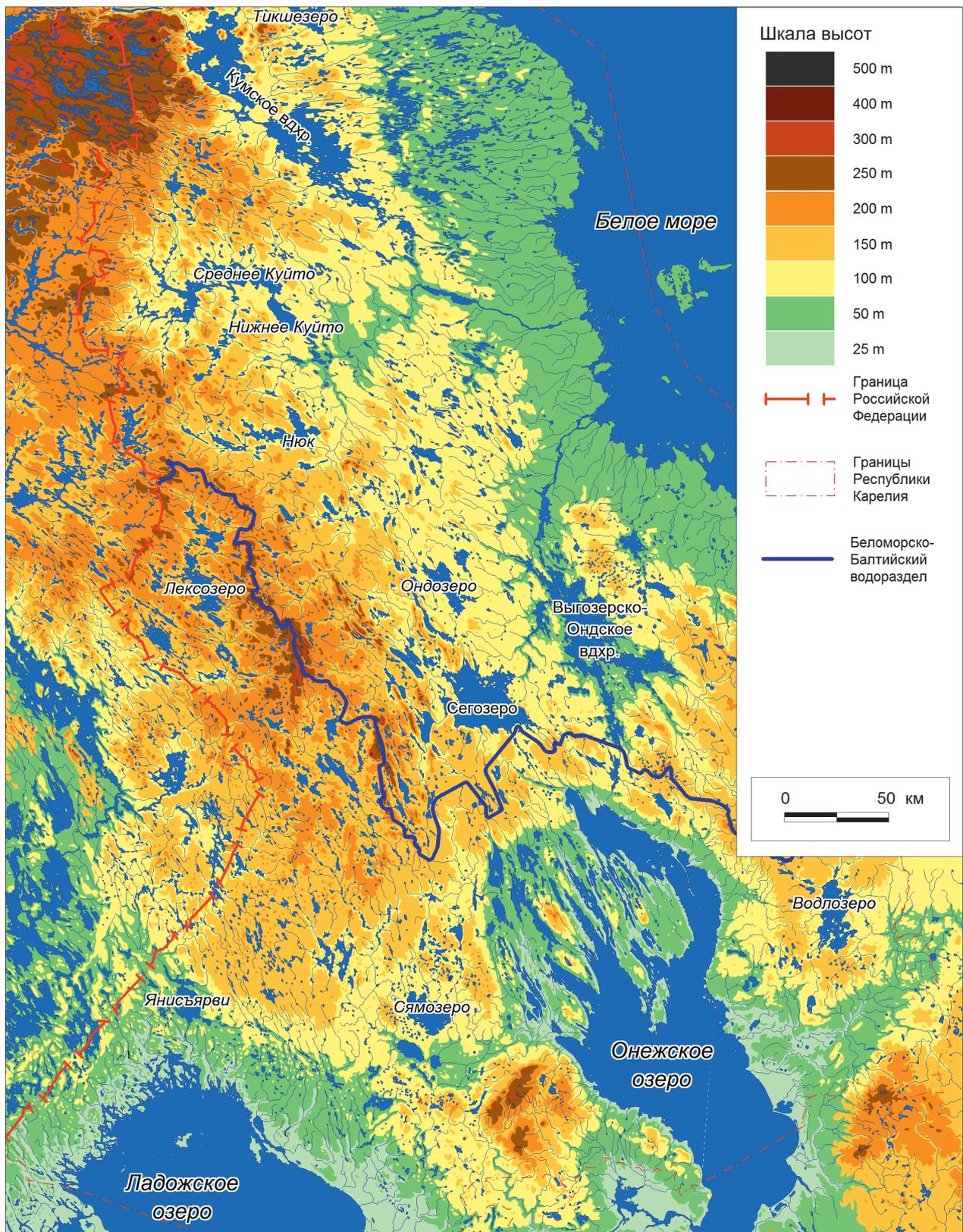


Рис. 1. Гидрографическая сеть Республики Карелия

(«бессточные») и представленные, в основном, лесными и болотными озерцами (ламбами). Объем воды, аккумулированный в водохранилищах, расположенных на территории Карелии, равен 80,2 км³ (без Верхне-Свирского). Из них общая полезная емкость составляет 18,6 км³, что позволяет регулировать 47 % годового объема речного стока. Еще 65,0 км³ воды сосредоточено в озерах, остающихся в естественном состоянии. Кроме того, к этим цифрам следует добавить большие части объемов Онежского (Верхне-Свирское водохранилище) и Ладожского озер.

Абсолютные показатели не дают полного представления об обеспеченности водными ресурсами. Более показательны относительные характеристики – объем речного стока, приходящийся на единицу площади или одного жителя, которые превышают средние для Российской Федерации значения в 1,3 и 2,3 раза соответственно. *Таким образом, обеспеченность Карелии поверхностными водными ресурсами достаточно высока, и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики республики.* Серьезные проблемы с водоснабжением населения и отдельных хозяйственных объектов имеют либо организационно-технический характер, либо связаны с несоответствием качества воды в природных источниках предъявляемым требованиям.

Рассмотренные основные природные особенности гидрографии и водных ресурсов Карелии в совокупности с их климатическими и геолого-геоморфологическими условиями оказывают заметное влияние на характер развития водного хозяйства республики. Основные результаты этого влияния следующие [Литвиненко и др., 1998]:

- Малая водоносность рек определяет тяготение наиболее крупных водоемких производств и населенных пунктов к большим водоемам, обладающим значительными запасами водных ресурсов для промышленного и коммунально-бытового водоснабжения, или устьям крупных рек. Соответственно, основные объемы загрязняющих веществ точечных источников поступают именно в такие водные объекты. Поэтому наиболее загрязнены крупные акватории, непосредственно примыкающие к основным промышленным центрам, – Кондопожская, Петрозаводская и Большая губы Онежского озера, Выгозеро и Беломорско-Балтийский канал, северная часть Ладоги, оз. Суоярви. Во многих из этих районов проявляются признаки антропогенного эвтрофирования, чему способствует и функционирование здесь

канализационных биологических очистных сооружений.

- Значительное сосредоточенное падение рек на ограниченных участках создает предпосылки для их энергетического использования, а узкие невысокие водоразделы – для привлечения в этих целях стока из соседних бассейнов. Наличие большого числа озер, входящих в озерно-речные системы, позволяет зарегулировать водотоки с меньшими затратами (путем создания озер-водохранилищ). Но в силу низкой водоносности рек мощность ГЭС невелика (до 230 МВт), и одна гидроэнергетика не может покрыть энергетические потребности Карелии.

- Ступенчатость продольного профиля, небольшая протяженность и сильная порожи́стость рек сводят к минимуму возможности их использования для судоходства. По этим же причинам большинство крупных глубоководных озер отрезано от основного для республики Беломорско-Балтийского водного пути, и здесь существуют лишь некоторые условия для организации местного каботажного судоходства.

- Высокая увлажненность, широкое распространение болот и заболоченных земель (около 30 % территории) в сочетании с небольшими площадями и фрагментарностью естественных сельскохозяйственных угодий и интенсивной вырубкой лесов в прошлые годы в наиболее обжитых районах обусловили значительное развитие лесной и сельскохозяйственной осушительной мелиорации, рассматриваемой нами как отрасль водного хозяйства, при полном отсутствии ирригации. Сброс больших объемов дренажных вод оказывает в ряде случаев негативное влияние на водные объекты, проявляющееся в повышении цветности воды, содержания железа, заилении нерестилищ.

- Серьезный ущерб, нанесенный ранее лесосплавом водным объектам, и ряд экономических причин привели к полному его прекращению. Однако экологические последствия этого вида водопользования проявляются до сих пор на многих озерно-речных системах.

- Большие удельные падения, порожи́стость, незначительный твердый сток, сравнительно устойчивый (зарегулированный озерами) водный режим карельских рек определяют их нерестовую ценность для проходных лососевых рыб.

- Большой озерный фонд, значительная протяженность нерестовых рек, богатство их иктофауны создают широкие возможности для развития в регионе рыбного хозяйства (промысел, товарное рыбоводство, акклиматизационные работы). Интенсивное развитие в настоящее время садкового рыбоводства привело

к появлению проблемы локального антропогенного эвтрофирования вследствие попадания в воду остатков кормов и отходов жизнедеятельности рыб.

- Огромное разнообразие чрезвычайно живописных и экзотичных водных объектов предопределяет интерес к ним со стороны рекреации, особенно водного туризма, спортивного и любительского рыболовства. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки уже сейчас комплекса природоохранных мероприятий для данного рода деятельности.

- Большие запасы поверхностных водных ресурсов при относительно небольших подземных обуславливают незначительное использование последних, хотя в настоящее время их значение возрастает, главным образом в связи с неудовлетворительным качеством поверхностных вод.

Удовлетворение потребностей населения и экономики в воде осуществляется при помощи системы специальных социально-экономических, научно-технических и организационных мероприятий. Наиболее распространенным термином, определяющим эту систему, является термин «водное хозяйство», под которым понимается «совокупность мероприятий, направленных на изучение, учет, охрану и использование водных ресурсов для нужд народного хозяйства, а также на борьбу с вредным воздействием на воды» [Озиранский, 1979, с. 119].

Основными видами водных ресурсов, используемыми в республике в настоящее время, являются речной сток, водоемы, подземные воды. При этом более двух третей всего водозабора обеспечивают воды озер и водохранилищ (табл. 2), таким образом, озера и водохранилища являются основой функционирования всего водного хозяйства Карелии.

Таблица 2. Забор воды из природных источников (2009 г.)

	Забрано воды	
	Объем, тыс. м ³	Доля, %
Всего по республике	221 170	100
В том числе:		
из подземных источников	1939	0,9
из поверхностных источников	219 231	99,1
Из них:		
из озер	153 939	69,6
из рек	65 292	29,5

Современный водохозяйственный комплекс Карелии представлен следующими элементами.

1. Водопотребление – использование водных объектов (включая водоносные горизонты) с изъятием воды из них, независимо от способа изъятия, а также места, времени, качества и количества возвращаемой воды.

2. Водопользование – использование водных объектов без изъятия воды из них, независимо от влияния на их режим, качественные и количественные характеристики.

3. Водоотведение или сброс дренажных и сточных вод (включая в последние шахтные воды и ливневой сток с территорий населенных пунктов).

Каждая из существующих структурных единиц водохозяйственного комплекса имеет свои значимость, специфику, особенности развития. Однако его основу составляют водопотребление и водоотведение, которые в значительной степени характеризуют ситуацию во всем водном хозяйстве и определяют водно-экологические проблемы. Их динамика в большой мере характеризует ситуацию, существующую во всем водном хозяйстве и экологическое состояние водных объектов.

Общее водопотребление РК складывается из водопотребления следующих водохозяйственных отраслей:

- населения и коммунально-бытовых предприятий;
- промышленности (производственные и коммунально-бытовые нужды);
- теплоэнергетики;
- сельского хозяйства;
- рыбного хозяйства.

В 2009 г. централизованный забор воды для нужд населения и отраслей экономики в целом по республике составил 221 170 тыс. м³. Использовано около 97 % от забранной воды, остальное составляют потери (табл. 3).

Таблица 3. Структура водопотребления (2009 г.)

Отрасли экономики	Использовано воды	
	тыс. м ³	%
Коммунально-бытовое хозяйство	61 644	28,8
Промышленность и теплоэнергетика	118 587	55,5
Сельское хозяйство	584	0,3
Рыбное хозяйство	33 038	15,4
Всего по республике	213 853	100
Потери	7309	

Примечание. Здесь и далее в объем промышленного водопотребления включены и хозяйственно-питьевые нужды промышленности.

Наиболее значительным является промышленное водопотребление. Его объем по данным на 2009 г. составил 118 587 тыс. м³. Индустрия представлена целлюлозно-бумажным производством (ЦБП), лесным комплексом, черной и цветной металлургией, машиностроением и металлообработкой, производством строительных материалов, пищевой промышленностью, полиграфией. Основу составляет ЦБП, где расходуется 92,5 % промышленного водопотребления. Водопотребление практически

целиком сосредоточено в крупных промышленных центрах (Петрозаводске, Кондопоге, Сегеже) (табл. 4).

Таблица 4. Структура водопотребления по основным промышленным центрам, тыс. м³ (2009 г.)

Пром-центры	Использовано воды всего	На коммунально-бытовые нужды	В промышленности
Петрозаводск	40 094,5	36 490	3604,5
Кондопога	59 400	3851	55 517,5
Сегежа	40 238,8	4156	36 082,8

Поскольку промышленное водопотребление является доминирующим в водохозяйственном комплексе республики, именно оно и определяет динамику объемов используемой воды. До конца 1980-х гг. происходило постоянное наращивание выпускаемой продукции при одновременном увеличении объемов оборотной и повторно используемой воды с параллельным осуществлением других водосберегающих мероприятий. В результате этого объем прямого годового водопотребления в промышленности был практически постоянен (рис. 2).

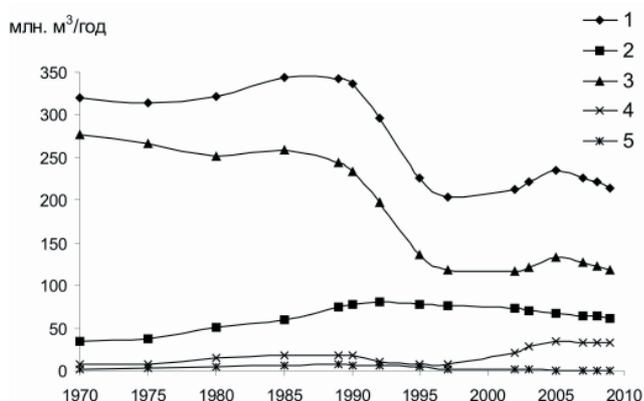


Рис. 2. Динамика водопотребления:

1 – общее водопотребление; 2 – коммунально-бытовое водопотребление; 3 – промышленное водопотребление; 4 – рыбохозяйственное водопотребление; 5 – сельскохозяйственное водопотребление

Начиная с 1989 г. в связи с ухудшающейся социально-экономической обстановкой в Карелии, как и по всей стране, происходил спад производства, что повлекло за собой резкое падение масштабов промышленного и общего водопотребления. Только после 1999 г. начался некоторый рост объема производства.

Вторым по объему водопотребления является коммунально-бытовое хозяйство. Для него в последние десятилетия существует некоторая тенденция увеличения объемов используемой воды. Она обусловлена ростом городского населения республики, развитием жилищного строительства, повышением степени благоу-

ройства жилого фонда. Однако сокращение по сравнению с 80-ми гг. масштабов строительства жилья и коммунально-бытовых объектов привело к стабилизации объемов коммунально-бытового водопотребления.

В последнее десятилетие (в связи с ростом товарного рыбоводства) быстро развивается рыбное хозяйство.

Объем сельскохозяйственного водопотребления крайне незначителен и начиная с 1990-х гг. постоянно снижается.

С процессом водопотребления неразрывно связан процесс водоотведения, под которым подразумевается возврат сточных, дренажных, карьерных (шахтных) и ливневых вод в природные (в первую очередь водные) или некоторые специально созданные объекты. В 2009 г. на территории Карелии было учтено 228 316,1 тыс. м³ всех видов вод, сброшенных в организованном порядке. Основной их объем поступил в водные объекты, некоторая часть – в выгреба и на рельеф (табл. 5).

Таблица 5. Сброс сточных, дренажных, карьерных и ливневых вод (2009 г.)

	Объем, тыс. м ³	Доля, %
Всего сброшено сточных, дренажных, карьерных и ливневых вод	228 316,1	
В том числе:		
в водные объекты	224 082,1	100,0
Из них:		
без очистки	9899,8	4,4
недостаточно очищенные	180 195,2	80,4
нормативно чистые без очистки	33 987,1	15,2
в выгреба и на рельеф	4234,0	

Основную долю объема сточных вод дают крупные промышленные центры – Петрозаводск, Кондопога, Сегежа, Костомукша, Надвоицы.

Водоотведение, оказывающее наиболее сильное влияние на водно-экологическую ситуацию, является во многом производной от водопотребления. Их объемы (как суммарные, так и отраслевые) тесно коррелируют друг с другом, вследствие чего динамика их развития имеет сходный характер. Максимальные объемы сточных вод сбрасывались в водные объекты во второй половине 1980-х гг. (до 310 млн м³ в год). К 2009 г. их количество снизилось примерно на треть и составило 228 млн м³. Основной вклад вносит промышленность (около 60 %), где по этому показателю также лидирует ЦБП. Остальная часть почти полностью приходится на долю коммунального хозяйства.

Большая часть сточных вод, поступивших в водные объекты (80 %), проходит очистку, но в

недостаточной степени. Остальная часть сбрасывается загрязненными или считается нормативно чистыми и сбрасывается без очистки.

Природные особенности гидрографии и водных ресурсов Карелии в совокупности с их климатическими и геолого-геоморфологическими условиями оказывают заметное влияние на характер развития водного хозяйства республики и наиболее типичные водно-экологические проблемы.

Многолетние исследования Института водных проблем Севера, посвященные вопросам комплексного использования и охраны водных ресурсов Карелии, позволили сформулировать ряд проблем, требующих решения в ближайшем будущем. Одной из основных является *проблема обеспечения населения качественной питьевой водой* [Водные ресурсы..., 2006].

Из 700 населенных пунктов только чуть более 100 в той или иной мере имеют обеспечение питьевой водой из централизованных источников. Охват жителей водопроводом по разным поселениям колеблется от нескольких процентов до 100, составляя, как правило, около 70 %. При этом качество воды даже в крупных городах не отвечает санитарным требованиям как из-за низкой кондиции природных вод Карелии, так и из-за несовершенной водоподготовки.

Современное питьевое водоснабжение республики ориентируется почти полностью (95 % от коммунально-бытового водопотребления) на использование поверхностных источников, качество исходной воды в которых чаще всего неудовлетворительное из-за низкой минерализации, высокого содержания органических веществ (значительная цветность), железа, марганца и других компонентов. Существенные проблемы возникают также в связи с антропогенным загрязнением водоемов. Единственным значительным населенным пунктом, использующим подземные воды, является г. Олонец.

При прокладке сетей используются, в основном, чугунные и стальные трубы. Поскольку водопроводная вода часто содержит большие концентрации органических веществ и не подщелачивается, она является агрессивной по отношению к этим материалам и вызывает их коррозию. Это увеличивает объемы утечек и риск попадания в водопроводную сеть некондиционной (в том числе канализационной) воды из окружающей среды. Кроме того, на качестве водопроводной воды сказываются и отложения, накапливающиеся в трубах. По оценкам районных администраций, доля изношенных участков сетей колеблется по населенным пунктам от 10 до 80 %. Необходимы работы по реконструкции

сети в первую очередь в городах Петрозаводске, Лахденпохье, Сортавале, Суоярви и Медвежьегорске.

По европейским стандартам наиболее существенными проблемами для качества водопроводной воды являются высокий показатель цветности и перманганатной окисляемости, низкое значение pH (обычно ниже 7) и минерализации, повышенное содержание железа и иногда марганца. При водоподготовке чаще всего используется механическая очистка воды без применения химических реагентов. С учетом низкого, как правило, качества исходной воды такой метод очистки является малоэффективным. В частности, цветность воды практически не снижается. Таким образом, для большинства населенных пунктов Карелии вода постоянно или периодически не соответствует нормативам российского ГОСТа «Вода питьевая», в том числе и по бактериологическим показателям. Выбор конкретного пути решения данной проблемы должен определяться для каждого случая отдельно. Однако он должен базироваться, во-первых, на надежных исходных данных о количестве, качестве и режиме потенциальных водоисточников, а во-вторых, на научно обоснованных рекомендациях по их оптимальному выбору, эксплуатации и охране.

Неблагополучная санитарная обстановка на большинстве источников питьевого водоснабжения обуславливает необходимость применения для обеззараживания питьевой воды повышенных доз хлора (хлорирование – основной метод обеззараживания, используемый в Карелии). Однако хлорирование высокоцветных, богатых органикой вод приводит к образованию хлорорганических соединений, вызывающих мутагенный и канцерогенный эффекты [Водные ресурсы..., 2006].

Снизить уровень хлорирования в настоящее время без риска для здоровья, из-за экономических причин, по-видимому, невозможно. Улучшение положения может быть достигнуто либо переходом на использование исходной воды более высокого качества, либо значительным усовершенствованием процессов водоподготовки и, прежде всего, сокращением первичного хлорирования. В целом необходимо стремиться к переходу, где есть возможность, на использование подземных вод из четвертичных отложений, кристаллических пород или на искусственные подземные воды, фильтрующиеся через песчаные отложения. Именно такой путь улучшения качества питьевого водоснабжения избран в соседней Финляндии, где для питьевых целей используется около 50 % вод из подземных источников. Там, где нет

возможности перехода на более качественную исходную воду, необходимо повышение эффективности очистки как за счет совершенствования существующих процессов, так и путем создания новых ступеней очистки, в том числе и для подщелачивания воды. Для снижения агрессивности воды необходимо повышение показателя рН как минимум до 8. Кроме того, следует укомплектовать станции водоподготовки необходимым оборудованием, в частности, приборами дистанционного контроля за различными процессами, водомерами, насосами соответствующих марок.

Основным фактором антропогенного влияния на водные объекты Карелии является сброс сточных вод промышленных центров. В 2009 г. суммарное водопотребление составило около 214, а водоотведение – 228 млн м³ (в том числе 23,8 млн м³ дренажных, карьерных и ливневых вод). На хозяйственно-питьевое водоснабжение приходится 29 %, промышленное – 56 %. Наибольшее водопотребление и водоотведение приходится на целлюлозно-бумажную промышленность (около 92,5 % от промышленного).

Из всех промцентров по сбросу органических, минеральных и взвешенных веществ выделяется г. Кондопога, по сбросу общего фосфора – Петрозаводск, что в первом случае отражает недостаточную эффективность очистки сточных вод, а во втором – их специфику. Большинство сточных вод относится к органоминеральным и биогенным загрязнителям, воды хвостохранилища ОАО «Карельский окатыш» (г. Костомукша) – к чисто минеральным. Из водоприемников сточных вод выделяются Кондопожская и Петрозаводская губы Онежского озера, Северное Выгозеро и Среднее Куйто, имеющие большие акватории и объемы водных масс.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: aleks-litvinenko@mail.ru
тел.: +7921 2239383

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: mari-mb@mail.ru
тел.: +7921 4630148

В условиях Карелии мелиорация земель приводит к увеличению выноса взвешенных и органических веществ, железа, макрокомпонентов, фосфора, что отражается на качестве воды водоприемников. При лесной мелиорации приведенные показатели в озерах возрастают по сравнению с фоновыми в 1,5–2 раза. При сельскохозяйственной мелиорации вынос веществ еще более возрастает, хотя в настоящее время влияние осушения на водные объекты существенно снижается.

Отмеченные проблемы требуют существенно внимания и решения в ближайшем будущем.

Литература

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркюя и др. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. 263 с.

Гашева В. Ф. Некоторые особенности гидрографии КАССР // Сб. работ Ленинградской гидрометеороbservатории. 1967. Вып. 4. С. 103–114.

Гершензон Т. Е., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Лифшиц В. Х. Водохозяйственное районирование территории в условиях высокой водообеспеченности (на примере Карельской АССР) // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 141–146.

Концепция государственной политики устойчивого водопользования в Российской Федерации (проект). М., 1998. 58 с.

Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Лозовик П. А., Карпечко В. А. Региональная экология: эколого-экономические основы рационального использования водных ресурсов Карелии // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 3–13.

Озиранский С. Л. Проблемы формирования отрасли «Водное хозяйство» // Проблемы формирования отрасли «Водное хозяйство» в СССР в отдаленной перспективе. М., 1979. С. 526–546.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л., 1965. 700 с.

Litvinenko, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: aleks-litvinenko@mail.ru
tel.: +7921 2239383

Bogdanova, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mari-mb@mail.ru
tel.: +7921 4630148

Карпечко Валентина Алексеевна

главный гидролог
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
тел.: +7911 4101398

Литвинова Ирина Абрамовна

инженер-исследователь
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: litvinova@rambler.ru
тел.: +7921 4630148

Филатов Николай Николаевич

директор ИВПС КарНЦ РАН, член-корр. РАН
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru
тел.: (8142) 576381; +7921 6292222

Karpechko, Valentina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: +7911 4101398

Litvinova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinova@rambler.ru
tel.: +7921 4630148

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru
tel.: (8142) 576381; +7921 6292222

УДК 556.531.4 (470.22)

ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ, КРУГОВОРОТА И ОБРАЗОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

П. А. Лозовик, А. В. Рыжаков, А. В. Сабылина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Рассмотрены кинетические закономерности трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах на примере водоемов Карелии. Установлено, что трансформация органических веществ, $N_{\text{орг}}$ и $P_{\text{общ}}$, связанная с ассимиляционной способностью водных объектов, протекает намного медленнее, чем круговорот азотистых соединений и продукционно-деструкционные процессы. В составе лабильного органического вещества (ОВ) обнаружены углеводы, белки, аминокислоты и липиды.

Ключевые слова: трансформация, круговорот, образование, продукция, деструкция, органическое вещество, биогенные элементы, природные воды.

Р. А. Lozovik, A. V. Ryzhakov, A. V. Sabylina. PROCESSES OF MATTER TRANSFORMATION, CYCLES AND FORMATION IN NATURAL WATERS

Kinetic patterns in the transformation, cycle and formation of matter in natural water bodies are considered with Karelia as the example. We found that the transformation of organic substances, N_{org} and P_{tot} , related to the assimilating capacity of the water bodies, proceeds at a much slower rate than the cycle of nitrogenous substances and production-destruction processes. Labile organic matter was found to comprise carbohydrates, proteins, amino acids, and lipids.

Key words: transformation, cycle, formation, production, destruction, organic matter, nutrients, natural waters.

Введение

Внутриводоемные процессы, которые влияют на качество воды и функционирование водных экосистем, можно разделить на три основные группы:

- трансформация веществ и их удаление из водной среды;
- внутриводоемный круговорот биогенных элементов и других соединений;
- продукционно-деструкционные процессы [Эволюция..., 1988; Бульон, 1994].

Под трансформацией веществ понимают их седиментацию и захоронение в донных отложениях, окисление части органического вещества

(ОВ) до CO_2 и H_2O , восстановление некоторых форм азота до N_2 химическим путем, переход веществ из растворенного состояния в коллоидно-дисперсное и последующую их коагуляцию и ряд других процессов. Их влияние на качество воды хорошо заметно в озерах с замедленным водообменом, в которых показатели содержания неконсервативных веществ (Fe, ОВ, Si, $N_{\text{орг}}$, $P_{\text{общ}}$) намного меньше, чем в приточных водах [Ладожское озеро..., 2002].

Вторая группа процессов связана с внутриводоемным круговоротом соединений: переходом одних их форм в другие как химическим, так и биохимическим путем. К таким процессам следует отнести «Fe, Mn-цикл» в водоемах,

имеющий ярко выраженный сезонный характер [Даувальтер, 2007]. В зимний период наблюдается активное поступление Fe^{2+} и Mn^{2+} из донных отложений в воду, затем окисление этих форм в период открытой воды с образованием труднорастворимых соединений до $Fe(III)$ и $Mn(IV)$ и поступление последних в донные отложения. Наибольшее значение для функционирования водных экосистем имеет внутриводоемный круговорот биогенных элементов – соединений P, N, Si, наряду с процессами их трансформации [Кузнецов и др., 1985]. Непрерывный круговорот азотистых соединений заключается в переводе $N_{орг}$ в NH_4^+ в результате аммонификации, далее идет окисление NH_4^+ до NO_2^- и NO_3^- (нитрификация) и потребление NO_3^- бактерио- и фитопланктоном, что фактически замыкает этот процесс. Аналогичное можно отметить и для соединений фосфора и кремния. Минеральные формы фосфора, прежде всего дигидро- и гидрофосфаты, потребляются в процессе фотосинтеза и бактериальной деструкции и переходят в органические формы фосфора. Затем происходит их окисление в водной среде при отмирании клеток планктона, вновь приводящее к образованию фосфатов. Кремний активно потребляется планктоном, особенно диатоновыми водорослями [Schelske, 1976]. При их отмирании он частично переходит в воду, а большей частью – захоранивается в донных отложениях.

Особую роль в водных объектах играют продукционно-деструкционные процессы, в результате протекания которых происходит образование автохтонного ОВ, существенно отличающегося от аллохтонного ОВ по качественному составу. Основу автохтонного ОВ составляют углеводы, мочевина, белки, аминокислоты, летучие органические кислоты и другие соединения. Поэтому целью работы было установить закономерности протекания внутриводоемных процессов трансформации, круговорота и накопления веществ в водной среде на примере некоторых водных объектов Карелии с использованием новых методических подходов, разработанных авторами.

Трансформация веществ в водных экосистемах

Внутриводоемные процессы трансформации неконсервативных веществ (органического вещества, фосфора, железа, кремния) наряду с их внешним поступлением в озеро с водосборной территории и с атмосферными осадками, выпадающими на его поверхность, являются существенным фактором формирования качества воды. Для оценки степени трансформации веществ в озерных системах широко использу-

ется в лимнологии показатель удерживающей способности: $R = (\bar{C}_{пр} - C_{ос})/\bar{C}_{пр}$. Он не является кинетическим параметром, а показывает относительное понижение концентрации вещества в озере и отражает скорость его трансформации. Для нахождения кинетических параметров была разработана модель трансформации веществ в озерных системах [Lozovik, 2003; Лозовик, 2006; Лозовик и др., 2007, 2010; Лозовик, Рыжаков, 2009]. В результате было получено кинетическое уравнение:

$$R/(1 - Re^{-\tau}) = k\tau, \quad (1)$$

позволяющее рассчитывать константы скорости трансформации веществ по величине τ и удерживающей способности. Для больших озер ($\tau \geq 10$) уравнение (1) преобразуется к более простому виду $R/(1 - R) = k\tau$, а для высокопроточных ($\tau \ll 1$) – $R = k\tau$.

Удерживающая способность и константы скорости трансформации были рассчитаны с использованием данных по химическому балансу озер и их водообмену (табл. 1). Для озер учитывалось содержание только аллохтонного ОВ и $N_{орг}$ в его составе, которое оценивалось по их доле от общего количества ОВ, выраженное по биохроматной окисляемости [Лозовик и др., 2007].

Анализ данных табл. 1 показывает, что наименьшие значения констант для всех компонентов наблюдаются для больших стратифицированных озер: Онежского, Ладожского и Сегозеро (τ 10–16 лет) и большие – для малых нестратифицированных озер с периодом водообмена от 0,4 до 3,1 года. Причина таких различий кроется в том, что большие озера в сравнении с малыми – холодноводные и имеют более низкую среднегодовую температуру, а также меньшую продолжительность периода повышенных температур (свыше 10 °С) в поверхностных слоях воды. Второй причиной является разный качественный состав лабильного вещества, поступающего в озера с приточными водами, что видно на примере соединений Fe. В Ладожском озере, принимающем сток трех крупных рек, вытекающих из больших озер, константа скорости трансформации $Fe_{общ}$ меньше, чем в других больших озерах. Это объясняется поступлением в Ладожское озеро воды с более трансформированными соединениями Fe. Максимальная константа скорости трансформации $Fe_{общ}$ в оз. Водлозеро, по-видимому, связана с притоком речных вод с очень высоким содержанием соединений Fe ($\bar{C}_{пр} = 1,3$ мг/л). Их гидролиз приводит к быстрому уменьшению концентрации $Fe_{общ}$ в озерной воде, и, как следствие этого, озеро имеет высокое значение удерживающей способности по отношению к $Fe_{общ}$ ($R = 0,60$), несмотря на малый период водообмена ($\tau = 0,5$ года).

Таблица 1. Период водообмена, удерживающая способность озер и константы скорости трансформации веществ

Озеро	τ, лет	OB		N _{орг}		Fe _{общ}		P _{общ}		Si	
		R	k, год ⁻¹	R	k, год ⁻¹	R	k, год ⁻¹	R	k, год ⁻¹	R	k, год ⁻¹
1. Онежское	15,6	0,72	0,14	0,64	0,10	0,91	0,41	0,72	0,14	0,85	0,27
2. Ладожское	11,7	0,70	0,17	0,69	0,16	0,75	0,21	0,63	0,13	0,74	0,20
3. Сегозеро	9,95	0,68	0,18	0,70	0,19	0,88	0,43	0,68	0,18	0,33	0,05
4. Сямозеро	3,13	0,52	0,27	0,45	0,21	0,68	0,43	0,48	0,24	0,58	0,32
5. Вендюрское	2,29	0,60	0,42	0,43	0,26	0,82	0,76	0,30	0,16	-0,03	-
6. Исо-Пюхярви	1,26	0,35	0,33	0,27	0,25	0,41	0,40	0,39	0,38	0,39	0,37
7. Остер	1,16	0,40	0,42	0,31	0,31	0,68	0,82	0,26	0,38	0,06	0,06
8. Селецкое	0,95	0,44	0,55	0,42	0,52	0,63	0,85	0,42	0,52	0,03	0,04
9. Крошнозеро	0,88	0,39	0,51	0,38	0,49	0,60	0,85	0,47	0,63	0,57	0,80
10. Пряжинское	0,79	0,48	0,70	0,13	0,17	0,32	0,45	0,31	0,44	0,74	1,17
11. Водлозеро	0,50	0,35	0,74	0,45	0,97	0,60	1,30	0,27	0,57	0,57	1,23
12. Суоярви	0,41	0,13	0,33	0,04	0,11	0,14	0,34	0,00	0,00	0,11	0,28

Трансформация соединений Si заметно варьирует. В озерах Сегозерской группы (Остер, Селецкое) и в оз. Вендюрском концентрация Si в приточных водах равна его концентрации в озерной воде. В этих озерах наблюдается отсутствие трансформации Si, что можно объяснить неучтенным источником поступления Si с подземными водами, непосредственно разгружающимися в озеро, или его выщелачиванием из подстилающих пород со дна. Вероятно, по указанным причинам отмечена очень низкая константа скорости трансформации Si и в оз. Сегозеро (0,05 год⁻¹) против 0,27 в Ладожском и 0,20 год⁻¹ в Онежском озере. Для эвтрофных озер (Водлозеро, Пряжинское и Крошнозеро) отмечены очень высокие константы скорости трансформации Si (0,80–1,23 год⁻¹). В них активно протекает фотосинтез и потребляется SiO₂ планктоном. Из-за мелководности озер (h_{ср} 2,8–5,7 м) Si из планктона не успевает в них регенерироваться в водной толще и оказывается захороненным в донных отложениях в отличие от олиготрофных и более глубоких (h_{ср} 9–29 м) озер Остер, Селецкое и Сегозеро.

Константы скорости трансформации P_{общ}, а также OB и N_{орг} аллохтонного происхождения имеют близкие значения для больших и малых озер (см. табл. 1). Средние значения k для этих трех компонентов в больших озерах составляют 0,16 год⁻¹ и в малых – 0,43 год⁻¹. По-видимому, для этих компонентов имеет место близкий механизм их трансформации.

Температурную зависимость констант скоростей трансформации рассмотрим на примере P_{общ}, OB и N_{орг} для больших (k = 0,16 год⁻¹) и малых (k = 0,43 год⁻¹) озер. Температурные условия в больших и малых озерах в зимний, весенний и осенний периоды можно считать близкими, а в летний они существенно отличаются. В этот сезон следует ожидать и наибольшую трансформацию веществ в озерных системах. Среднегодовую температуру в больших озерах

примем около 5 °С, а в малых – около 14 °С. Используя известное уравнение

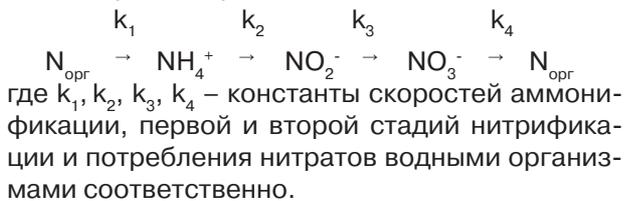
$$\ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \frac{T_2 - T_1}{10} \ln \gamma,$$

получим, что температурный коэффициент (γ) трансформации P_{общ}, OB и N_{орг} равняется 3,0, что согласуется с правилом Вант-Гоффа. Поэтому можно считать, что основные различия в константах скоростей трансформации P_{общ}, OB и N_{орг} в больших и малых озерах связаны с особенностями их температурного режима.

Внутриводоемные процессы круговорота азота в природных водах

Азот наряду с фосфором и кремнием является важнейшим биогенным элементом. От количества и форм его соединений во многом зависит общая биопродуктивность водоемов [Кузнецов и др., 1985]. Выделяют минеральные формы азота – аммоний, нитриты, нитраты и органическую, включающую белки, полипептиды, аминокислоты, амиды, мочевины и др. Ранее в ИВПС КарНЦ РАН был накоплен большой массив данных по содержанию основных форм азота в водных объектах Карелии. В большинстве водоемов распределение форм азота подчиняется следующей закономерности: N_{орг} (0,44) >> NH₄⁺ (0,05) > NO₃⁻ (0,01) >> NO₂⁻ (0,001 мг N/л) (в скобках указаны средние региональные значения концентраций азотистых веществ). Среди форм азота превалирует N_{орг}, а из минеральных – NH₄⁺. Из этой закономерности исключаются большие стратифицированные озера, в которых содержание нитратов в гипolimнионе намного больше, чем аммония. В них при низкой температуре на глубине в отсутствие света не происходит потребление NO₃⁻ планктоном и нитраты накапливаются в водной среде [Лозовик, Бородулина, 2009]. Динамика изменения состава и соотношения различных соединений азота определяется интенсивностью их биохимической (бактериаль-

ной) трансформации в результате протекания внутриводоемного круговорота, представляющего собой циклическую цепь последовательных реакций первого порядка:



Используя методы лабораторного моделирования и анализа натуральных данных, мы впервые определили кинетические характеристики данных реакций (константы скоростей, средние величины скоростей, время полупревращения).

Для опытов использовали природную воду из разнотипных водоемов Карелии (озера Онежское, Чучъярви, Крошнозеро, Кривое, р. Лососинка). Пробы воды объемом 1 л инкубировали при 19–22 °С в темноте в неплотно закрытых сосудах для обеспечения доступа кислорода. В исходной воде и далее через определенные промежутки времени определяли содержание $N_{\text{общ}}, N_{\text{орг}}, NH_4^+, NO_2^-$ и NO_3^- . Строили кинетические зависимости концентрации NH_4^+ и NO_2^- от времени реакции. Количество этих соединений постепенно растет и достигает своих максимумов, а далее снижается. По графикам определяли величины максимумов содержания NH_4^+ и NO_2^- , а также время их достижения. Эти экспериментальные данные необходимы для расчета значений k_1, k_2 и k_3 с использованием кинетической теории последовательных реакций первого порядка, описанной в монографии [Эммануэль, Кнорре, 1974]. Известно, что аммонификация и нитрификация являются реакциями первого порядка [Леонов, Айзатуллин, 1977]. Для нахождения k_1 и k_2 применяли систему из двух уравнений:

$$[N_{\text{амм}}]_{\text{макс}} - [N_{\text{амм}}]_0 = [N_{\text{орг}}]_0 \cdot \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^{\frac{k_2}{k_1 - k_2}}, t_{\text{макс}} = \frac{\ln \frac{k_2}{k_1}}{k_2 - k_1} \quad (2)$$

где $[N_{\text{амм}}]_{\text{макс}}$ – максимальная концентрация ионов аммония, $[N_{\text{амм}}]_0$ – начальная концентрация ионов аммония, $[N_{\text{орг}}]_0$ – начальная концентрация органического азота, $t_{\text{макс}}$ – время достижения максимальной концентрации аммонийного азота. По значениям k_1 и k_2 были рассчитаны средние скорости реакций аммонификации (V_1) и первой стадии нитрификации (V_2) для озерных вод (табл. 2) [Рыжаков и др., 2010].

Наличие максимумов на графиках зависимости концентрации NO_2^- от времени позволило определить константу скорости второй стадии нитрификации (k_3). Расчет проводили по формуле:

$$[NO_2^-]_{\text{макс}} - [NO_2^-]_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot [N_{\text{орг}}]_0 \left[\frac{e^{-k_1 t}}{(k_2 - k_1)(k_3 - k_1)} + \frac{e^{-k_2 t}}{(k_1 - k_2)(k_3 - k_2)} - \frac{e^{-k_3 t}}{(k_1 - k_3)(k_2 - k_1)} \right], \quad (3)$$

где $[NO_2^-]_{\text{макс}}$ – максимальная концентрация N- NO_2^- ; k_1 – константа скорости аммонификации; k_2 – константа скорости первой стадии нитрификации; $[NO_2^-]_0$ – начальная концентрация NO_2^- ; t – время достижения максимальной концентрации NO_2^- ; $[N_{\text{орг}}]_0$ – начальная концентрация $N_{\text{орг}}$. Далее были рассчитаны и величины k_4 – константы скорости ассимиляции нитратов до $N_{\text{орг}}$. Для этого среднюю скорость 1, 2 и 3 стадии цепи (0,018 мг N · л⁻¹ · сут⁻¹) разделили на среднюю концентрацию NO_3^- (0,01 мг N/л) в водных объектах Карелии и получили $k_4 = 1,8$ сут⁻¹.

Таблица 2. Константы скоростей и истинные скорости аммонификации и нитрификации в разнотипных озерах Карелии

Озеро	k_1	k_2	V_1	V_2
	сут ⁻¹		мг N · л ⁻¹ · сут ⁻¹	
Онежское	0,03	0,33	0,02	0,02
Чучъярви	0,01	0,38	0,01	0,01
Крошнозеро	0,03	0,62	0,02	0,03
Кривое	0,04	0,30	0,03	0,02

Средние значения кинетических характеристик отдельных стадий круговорота азотистых веществ в природных водах Карелии представлены в табл. 3.

Таблица 3. Средние значения кинетических характеристик отдельных стадий круговорота азотистых веществ в природных водах Карелии

Характеристика	Аммонификация	1-я стадия нитрификации	2-я стадия нитрификации	Ассимиляция NO_3^- до $N_{\text{орг}}$
k , сут ⁻¹	0,04	0,34	2,35	1,80
$\tau_{1/2}$, СУТ	17,3	2,0	0,3	0,4
V , мг N · л ⁻¹ · сут ⁻¹	0,018			

Сравнивая между собой значения k для различных стадий, можно сказать, что они находятся в обратной зависимости от концентраций соединений азота, которые являются исходными для соответствующих стадий цикла. Так, наименьшей константой скорости является k_1 , а наибольшей – k_3 . Поэтому для большинства водных объектов Карелии содержание $N_{\text{орг}}$ значительно превалирует над другими, а ионы NO_2^- не успевают накапливаться, и их концентрация всегда остается на очень низком уровне. Поскольку $k_2 > k_1$, то в водных объектах преобладают ионы NH_4^+ над NO_3^- .

Таким образом, сочетание натуральных данных с методами лабораторного моделирования

позволяет установить кинетические характеристики круговорота азотистых соединений, как отдельных его стадий, так и всего цикла в целом.

Продукционно-деструкционные процессы

Продукционно-деструкционные процессы играют важную роль в водных экосистемах. Они приводят к образованию автохтонного ОВ, а основные продуценты и деструкторы (фито- и бактериопланктон) являются кормовой базой зоопланктона. Широко известно, что деструкция во многих северных водоемах и морских экосистемах выше, чем продукция, и только в высокопродуктивных объектах продукция больше деструкции [Бульон, 1994; Сапожников, 2003].

Особенности протекания продукционно-деструкционных процессов рассмотрим на примере некоторых озер Карелии, по которым имеются сведения по продукции, деструкции, БПК₅, БПК₂₀ и по содержанию автохтонного ОВ [Харкевич и др., 1985; Сабылина, Басов, 2000, 2003; Теканова, Тимакова, 2006]. В число объектов включены озера с различным водообменом, уровнем трофии и гумусностью воды (табл. 4). Все эти водоемы мало подвержены антропогенному влиянию от точечных источников загрязнения, поэтому деструкции подвергается в основном лабильное ОВ природного происхождения.

О высоком уровне трофии водоемов можно судить по величинам БПК₅ и БПК₂₀ (табл. 4). Эти показатели наибольшие в озерах Крошнозеро, Святозеро, Миккельское и Вохтозеро, которые являются эвтрофными. В остальных озерах эти величины намного меньше и соответствуют уровню олиго-, мезотрофных водоемов.

Содержание автохтонного ОВ оценено по эмпирической формуле с использованием данных по ХПК, ПО и цветности: $p_{авт} = 0,62ХПК / Hum - 0,35$, где $Hum = \sqrt{ЦВ \cdot ПО}$ [Лозовик и др., 2007]. Наиболее высокая доля автохтонного ОВ (свыше 40 %) отмечена в озерах Онежское, Пертозеро, Каменное, Пяозеро, Топозеро, Ковдозеро, Святозеро и Миккельское. В первых пяти озерах высокая доля автохтонного ОВ связана с их замедленным водообменом (τ 3,3–15,6 года), и, как следствие этого, продукционно-деструкционные процессы приводят к накоплению ОВ автохтонной природы. Большое содержание автохтонного ОВ в оз. Святозеро обусловлено прежде всего его эвтрофным характером и малым удельным водооборотом ($\Delta F = 3,1$). Хотя оз. Крошнозеро эвтрофное, но оно достаточно проточное ($\tau = 0,9$ года), доля автохтонного ОВ в нем невысока. Несмотря на то что оз. Миккельское еще более проточное, чем Крошнозеро, оно принимает сток с последнего озера, является более эвтрофным, и доля автохтонного ОВ в нем выше (51 %). Повышенная доля автохтонного ОВ в проточном оз. Ковдозеро связана с тем, что основной приток воды в него поступает из оз. Пяозеро, имеющего высокое содержание автохтонного ОВ. В остальных озерах доля автохтонного ОВ меньше (7–30 %). Из последней группы выделяется оз. Риндозеро (самым низким процентом автохтонного ОВ) и оз. Вендюрское – более высокой долей автохтонного ОВ. Первое имеет меньший период водообмена ($\tau = 0,8$ года), чем второе ($\tau = 2,3$ года). Следует особо подчеркнуть, что содержание автохтонного ОВ определяется не только интенсивностью продукционно-деструкционных процессов в водном объекте, но и зависит от его водообмена и удельного

Таблица 4. Косвенные характеристики содержания ОВ и показатели деструкции и первичной продукции в некоторых озерах Карелии

№ п/п	Озеро	Hum	БО, мг О ₂ /л	БПК ₂₀		БПК ₂₀ /БО, %	$p_{авт}$	Р	А
				мг О ₂ /л					
1	Крошнозеро	29,3	28,0	3,04	5,52	20	0,24	1,06	0,90
2	Святозеро	10,8	15,0	3,41	5,09	34	0,51	0,95	0,95
3	Миккельское	27,0	33,6	4,29	8,70	26	0,42	1,32	1,13
4	Вохтозеро	17,5	17,8	1,59	5,93	33	0,28	0,26	0,19
5	Вендюрское	15,8	16,8	1,13	1,99	12	0,30	0,16	0,14
6	Риндозеро	31,3	21,2	0,90	1,80	8	0,07	0,24	0,09
7	Пертозеро	8,8	17,4	1,68	2,88	19	0,88	0,23	0,20
8	Топозеро	9,7	11,9	0,98	1,83	15	0,41	0,13	0,05
9	Пяозеро	8,5	11,3	0,88	1,87	17	0,47	0,09	0,06
10	Ковдозеро	9,8	13,0	0,37	0,94	7	0,47	0,11	0,06
11	Каменное	11,6	16,7	0,87	2,14	13	0,54	0,14	0,07
12	Сегозеро	12,7	12,6	0,95	2,01	16	0,27	0,03	0,02
13	Ср. Куйто	19,7	18,6	0,58	1,47	8	0,24	0,13	0,12
14	Нюк	23,0	23,4	0,62	1,52	6	0,28	0,24	0,13
15	Кимасозеро	27,1	22,3	1,02	2,27	10	0,16	0,10	0,05
16	Контоски	17,9	18,8	1,16	2,36	13	0,30	0,21	0,08
17	Онежское	10,8	14,7	0,84	1,68	11	0,42	0,09	0,05*

Примечание. * – данные для поверхностного горизонта.

водосбора, которые отражаются на степени утилизации в водоеме лабильного ОВ и в поступлении аллохтонного ОВ.

Анализ связи между лабильным и автохтонным ОВ по их доле от общего содержания ОВ (табл. 4) позволил выделить 5 озер с очень низким количеством как лабильного (в среднем 8 %), так и автохтонного (16 %) ОВ и 8 озер – с повышенной их долей (15 и 40 % соответственно). В четырех эвтрофных озерах при средней доле автохтонного ОВ (36 %) доля лабильного была выше (28 %), чем во всех остальных озерах. Поэтому лабильные ОВ природных вод следует считать источником и составной частью автохтонного ОВ.

В составе лабильного ОВ в ряде озер Карелии были исследованы биохимически легкоокисляемые соединения: углеводы, белки, аминокислоты и липиды. Данные о их количественном и качественном составе были получены на озерах Куйто, Топозеро, Пяозеро, Онежское и некоторых притоках и водоемах его бассейна (Крошнозеро, Святозеро, Тарасмозеро, Миккельское и др.) за многолетний период с 1980 по 2010 г. [Сабылина, Ипатова, 1985; Сабылина и др., 2010].

Суммарная концентрация углеводов в озерах Карелии колеблется от следовых количеств до нескольких мг/л. Содержание их повышено до 10 мг/л на мелководье эвтрофных озер в весенне-летний период, т. е. там, где в воду поступает большое количество ОВ, выделяемого фитопланктоном. В северных озерах Куйто, Топозеро, Пяозеро средние концентрации углеводов изменяются в пределах 1,5–2,8 мг/л. В центральном плесе Онежского озера, в Кондопожской и Петрозаводской губах их содержание не превышает 3 мг/л (в среднем около 2 мг/л). В евтрофированной части Кондопожской губы содержание углеводов в зимний (2009 г.) и весенне-летний (2010 г.) периоды выше и составляет в среднем 7 мг/л. Такие же высокие концентрации отмечены и в двух южных эвтрофных озерах Крошнозеро и Святозеро. Установлено, что в составе моносахаридов из гексоз преобладает глюкоза или манноза, а в составе пентоз преобладает ксилоза [Сабылина и др., 2010].

Концентрация белков в центральном плесе Онежского озера составляет 150 мг N/л, в его притоках – 160–410 мг N/л, а в мезотрофных губах Кондопожской и Петрозаводской – около 200 мг N/л. Наибольшее содержание белков в июле – августе (1986–1987 гг.) обнаружено в эвтрофных озерах Крошнозеро и Святозеро (710 и 875 мг N/л соответственно). В северных малопродуктивных озерах Куйто концентрация белков в течение года изменялась от 40 до 233 мг N/л.

Содержание растворенных аминокислот (РА) в холодноводных озерах Северной Карелии колебалось от 3 (Верхнее Куйто) до 14 мгк N/л (оз. Пяозеро) и в среднем составляло 7 мгк N/л [Сабылина, Ипатова, 1985]. В летний период в центральном плесе Онежского озера содержание РА достигало 10 мгк N/л, а в мезотрофных губах (Кондопожской, Петрозаводской) их количество было 15 мгк N/л. В притоках Онежского озера содержание РА изменялось от 5 до 32 мгк N/л [Кукконен, Пирожкова, 1984]. Концентрация РА в эвтрофных озерах Крошнозеро, Святозеро довольно высокая в летний период (около 33 мгк N/л), а в зимний период она в 2 раза меньше. В среднем в составе $N_{орг}$ на долю РА приходится 1–2 %, а на долю белков – 15–30 %. Сезонная динамика содержания белков и РА была изучена на оз. В. Куйто в поверхностном слое воды. Наибольшая концентрация $N_{орг}$ была обнаружена летом (420 мгк/л), а наименьшая – весной (270 мгк/л), а доля азота белков от $N_{орг}$ соответственно составила 15 и 30 %. Снижение доли белков летом, по-видимому, связано с более активной трансформацией их при повышенной температуре воды [Сабылина, Ипатова, 1985].

Исследования липидов проводились на озерах Куйто, Крошнозеро, Святозеро, Сямозеро, Онежское [Сабылина, Семенов, 1981; Сабылина, Басов, 2003]. Показано, что концентрация растворенных липидов в озерах Верхнее и Среднее Куйто колеблется от 20 до 206 мгк/л. В южных эвтрофных озерах в период массового развития планктона их содержание в поверхностном слое воды достигало 350 мгк/л, а в центре Онежского озера – 250 мгк/л. В групповом составе преобладают полярные липиды (30–45 % от их суммы) и жирные кислоты (15–20 %).

Анализ величин продукции и деструкции, полученных *in situ* в вегетационный период, показал, что наибольшие значения деструкции (D), как и БПК₅ и БПК₂₀, отмечены в эвтрофных озерах Крошнозеро, Святозеро, Миккельское, Вохтозеро. Значение продукции по Винбергу в указанных озерах было близким к деструкции, а в остальных, как правило, в 1,5–3 раза меньше (табл. 4). Такие различия вполне закономерны и объяснимы. В высокопродуктивных озерах, в которых содержится большое количество легкоокисляемых ОВ, суточная продукция существенно не влияет на потребление кислорода. В малопродуктивных озерах, в которых лабильного ОВ незначительное количество, на суточной продукции уже сказывается потребление кислорода продуцируемым ОВ.

Для выяснения этих различий рассмотрим, что учитывается при определении продукции

кислородным методом по Винбергу [Винберг, 1960] и из чего складывается изменение содержания O_2 при фотосинтезе и деструкции. Продукция (А) определяется по формуле: $A = \Delta O_2 + D$, где ΔO_2 – изменение содержания O_2 в течение суток в склянке на свету, D – деструкция (изменение за сутки содержания O_2 в склянке в темноте). Изменение содержания кислорода в ходе фотосинтеза складывается из следующих основных элементов: $(O_2)_{\text{исх}} + (O_2)_{\text{фотосинтеза}} - (O_2)_{\text{деструкции исходного ОВ}} - (O_2)_{\text{деструкции продуцируемого ОВ}} = (O_2)_1$ (содержание O_2 после суточной экспозиции на свету). Фактически в формуле Винберга не учитывается потребление O_2 на деструкцию продуцируемого ОВ в ходе опыта, что, собственно, и приводит к занижению результатов в малопродуктивных водоемах. Более логично расчет продукции проводить по следующей формуле:

$$P = \Delta O_2 + D + (\Delta O_2)_{\text{деструкции продуцируемого ОВ}} \quad (4)$$

Определить величину деструкции продуцируемого ОВ в ходе опыта не представляется возможным, поэтому все результаты по продукции являются заниженными.

Заключение

Разработанная модель трансформации неконсервативных веществ в озерных системах позволила получить кинетическое уравнение и установить константы скорости трансформации $P_{\text{общ}}$, аллохтонного ОВ и в его составе $N_{\text{орг}}$, а также соединений Fe и Si в поверхностных водах.

Применение теории последовательных реакций первого порядка к круговороту азота в природных водах позволило впервые определить кинетические характеристики отдельных стадий этого процесса и объяснить распределение основных форм азота в поверхностных водах Карелии.

Исследования продукционно-деструкционных процессов на ряде водоемов Карелии показали, что наибольшие значения деструкции, так же как и величин БПК₅ и БПК₂₀, характерны для эвтрофных озер, в которых отмечены близкие значения продукции и деструкции. В олиго- и мезотрофных водоемах величина продукции была в 1,5–3 раза меньше, чем деструкция. Наблюдаемый в последних водоемах отрицательный баланс ОВ связан с неучетом деструкции продуцируемого ОВ.

Продукционно-деструкционные процессы приводят к образованию лабильного ОВ, которое является источником и составной частью автохтонного ОВ. Основными компонентами лабильного ОВ являются углеводы, белки, аминокислоты, липиды, доля которых достигает 50–70 % от содержания автохтонного ОВ.

Литература

Бульон В. В. Закономерности первичной продукции в лимнических системах. СПб.: Наука, 1994. 222 с.

Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск, 1960. 328 с.

Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.

Кузнецов С. И., Саралов А. И., Назина Т. Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.

Кукконен Н. А., Пирожкова Г. П. Содержание свободных и связанных аминокислот в реках Онежского озера // Элементы экосистемы Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1984. С. 19–21.

Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцев, В. Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 54–93.

Леонов А. В., Айзатуллин Т. А. Кинетика и механизмы трансформации соединений биофильных элементов в водных экологических системах // Итоги науки и техники. Общая экология. Биоэкология. Гидробиология. М.: ВИНТИ, 1977. Т. 4. С. 100–107.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В. Внутриводоемные процессы трансформации и накопления лабильных веществ в озерных системах // Материалы науч.-практ. конф. «Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России». Ч. 1. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ростов-на-Дону, 2009. С. 124–127.

Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б. и др. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Формирование химического состава поверхностных вод Карелии // Материалы науч. конф., посвящ. 90-летию со дня образования Гидрохимического института (г. Азов, 27–28 мая 2010 г.). Ростов-на-Дону, 2010. С. 140–144.

Рыжаков А. В., Кукконен Н. А., Лозовик П. А. Определение интенсивности аммонификации и нитрификации в природных водах кинетическим методом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 1. С. 70–74.

Сабылина А. В., Басов М. И. Взаимосвязь факторов среды с первичной продукцией фитопланктона и деструкцией органического вещества в озерах Карелии // Проблемы гидроэкологии на рубеже веков. СПб., 2000. С. 155–156.

Сабылина А. В., Басов М. И. Абиотические факторы среды, первичная продукция и деструкция органического вещества в озерах Карелии // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2003. С. 72–90.

Сабылина А. В., Ипатов П. Г. Лабильные органические вещества в воде озер Куйто // Органическое

вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. С. 75–85.

Сабылина А. В., Семенов А. Д. Растворенные и взвешенные липиды в воде некоторых озер Карелии // Гидрохим. материалы. 1981. Т. 83. С. 10–22.

Сабылина А. В., Мусатова М. В., Кукконен Н. А. Содержание лабильных органических веществ в водоемах Карелии // Современные проблемы гидроэкологии. СПб., 2010. С. 151.

Сапожников В. В. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового Океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.

Теканова Е. Н., Тимакова Т. М. Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М., 2006. С. 60–70.

Харкевич Н. С. Гидрохимия озера Каменного // Природные воды района Костомукшского железорудного месторождения (Северная Карелия). Петрозаводск, 1985. С. 44–108.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лозовик Петр Александрович

зав. лаб. гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Рыжаков Александр Вадимович

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Сабылина Альбина Васильевна

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Харкевич Н. С., Сабылина А. В., Басов М. И. Интенсивность распада органического вещества в воде различных по типу озер Карелии // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. С. 111–123.

Харкевич Н. С., Сабылина А. В., Басов М. И. и др. Абиотические факторы среды и первичная продукция водоемов бассейна р. Ковды // Гидробиол. журн. Киев, 1984. Т. XX, вып. 5. С. 16–24.

Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод / Под ред. К. Я. Кондратова, И. С. Коплан-Дикс. Л.: Наука, 1988. 204 с.

Эмануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974. С. 181–190.

Lozovik P. A. Transformation of organic matter and nutrients in lakes Ladoga and Onego // Proceedings of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002. Joensuu, 2003. P. 68.

Schelske C. L. Silica and nitrate depletion as related to rate of eutrophication in Lakes Michigan, Huron and Superior // Great Lakes Res. Divis. Collected Repr. 1976. Vol. 5. P. 160–181.

Lozovik, Pyotr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Ryzhakov, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Sabylina, Al'bina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 574.632: [556.114: 544.354: 622] (470.22)

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ БИОТЫ ВОДОЕМОВ КАРЕЛИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИОННОГО СОСТАВА ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Н. М. Калинин, Т. А. Чекрыжева, Т. П. Куликова,
А. В. Рябинкин**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Поступление техногенных вод Костомукшского ГОКа в водоемы системы р. Кенти вызвало различную реакцию водных сообществ. Наибольшую устойчивость проявил фитопланктон, в то время как стенобионтные формы зоопланктона и зообентоса исчезали при незначительном уровне загрязнения. Эврибионтные представители зоопланктона, имеющие широкие толерантные диапазоны к спектру природных факторов среды, оказались наиболее устойчивыми и к действию антропогенного фактора. Причиной их высокой устойчивости к минеральному загрязнению является адаптация к условиям жизни во временных континентальных водоемах. Разнонаправленная реакция водных организмов на действие техногенных вод нашла подтверждение в результатах токсикологических экспериментов.

Ключевые слова: горнорудное производство, ионный состав воды, фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос, толерантность.

**N. M. Kalinkina, T. A. Chekryzheva, T. P. Kulikova, A. V. Ryabinkin.
PATTERNS IN THE RESPONSE OF THE BIOTA OF KARELIAN LAKES TO
CHANGES IN THE ION COMPOSITION UNDER THE IMPACT OF MINING
MILL WASTEWATERS**

Wastewater discharges from the Kostamuksha mining and ore concentration mill caused different responses from aquatic communities. Phytoplankton was the most resistant, whereas the stenobiotic species of zooplankton and zoobenthos disappeared at a low level of pollution. Eurybiotic zooplankton species, which are tolerant of a wide range of environmental factors, proved to be highly tolerant also of the human impact. The adaptation of eurybiotic species to conditions in the temporary waterbody resulted in their high tolerance of the mineral pollution. The different responses of aquatic organisms to the influence of the wastewaters is confirmed by toxicological experiments.

Key words: mining and ore concentration mill, ion composition of the water, phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos, tolerance.

Введение

На севере Карелии располагается железорудный Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК), крупнейший в северо-западном регионе России. Отходы комбината отводятся в искусственный водоем – хвостохрани-

лище, а затем в озера системы р. Кенти. С момента пуска в 1982 г. возрастает техногенная нагрузка обогатительной фабрики на окружающую среду. В 1982–1993 гг. объем поступающих техногенных вод из хвостохранилища в озерно-речную систему составлял около 2 млн м³ в год. Начиная с 1994 г. и по настоящее время объемы

поступления техногенных вод в систему р. Кенти возросли до 9–22 млн м³ в год. В результате загрязнения в водоемах системы нарушился ионный состав воды, которая превратилась из слабоминерализованной гидрокарбонатно-кальциевой в сульфатно-калиевую воду повышенной минерализации [Лозовик, Калмыков, 2007]. Загрязнение водоемов системы р. Кенти вызвало глубокую трансформацию в сообществах водных организмов. Цель настоящих исследований – выявить особенности реакции водных сообществ на изменение ионного состава водной среды. Задачи, которые решали для достижения цели: изучить динамику сообществ фитопланктона, зоопланктона и макрозообентоса в условиях нарастания минерального загрязнения; провести биотестирование техногенной воды Костомукшского ГОКа для различных видов ракообразных.

Материал и методы

Полевые исследования. Наблюдения проводили на озерах системы р. Кенти: Окуневое, Куроярви, Поппалиярви, Юрикоярви, Койвас, Кенто, Ломозеро, Юлиярви и Алоярви (63–66° с. ш.). Пробы фитопланктона (85 проб), зоопланктона (119 проб) и макрозообентоса (720 проб) отбирали в 1981–2008 гг. в летний сезон (июль – август). Пробы макрозообентоса отбирали дночерпателем Экмана-Берджа (площадь захвата 225–300 см²) и промывались через сито с диаметром пор 0,3–0,5 мм. Обработка проб осуществлялась по общепринятым методикам [Методика изучения..., 1975].

Экспериментальные исследования. В токсикологических экспериментах изучали токсичность техногенной воды Костомукшского ГОКа для водных животных по методике [Строганов, 1971]. Для этой цели в качестве тест-объекта использовали ракообразных из отряда Amphipoda *Gmelinoides fasciatus* Stebbing. Этот вид относительно недавно вселился в водоемы Карелии, в частности, в Онежское озеро и быстро освоил всю литоральную зону этого водоема [Березина, Панов, 2003]. Для опытов из Петрозаводской губы Онежского озера отлавливали молодых рачков *G. fasciatus*, размеры которых не превышали 2,5 мм. В другой серии экспериментов изучали раздельное действие растворов нитрата калия, хлорида натрия, хлорида кальция и сульфата магния на выживаемость рачков. Все растворы готовили в пересчете на катионы. Среднесмертельные концентрации (CL₅₀) катионов определяли табличным методом [Коросов, Калинкина, 2003].

Результаты и обсуждение

Фитопланктон. В фитопланктоне озер системы р. Кенти насчитывается 177 видов водорослей из 8 систематических отделов: Bacillariophyta – 68 (38 %), Chlorophyta – 41 (23 %), Chrysophyta – 28 (16 %), Cyanophyta – 12 (7 %), Cryptophyta – 8 (5 %), Euglenophyta – 11 (6 %), Dinophyta – 8 (5 %), Xanthophyta – 2 (1 %). Соотношение систематических групп фитопланктона в разных озерах системы зависит от степени их минерального загрязнения (табл. 1). В первые годы исследований (1987–1999 гг.) основную долю численности и биомассы фитопланктона в озерах составляли диатомовые водоросли [Чекрыжева, 1995; Вислянская, 2007]. В последующий период, начиная с 2001 г., в озерах возрастают концентрации азотистых веществ [Лозовик, Калмыков, 2007], что привело к возрастанию видового разнообразия фитопланктона, в составе которого возросли доли динофитовых, зеленых, синезеленых и эвгленовых водорослей. В 2003–2008 гг. в выше расположенных водоемах системы наблюдалось возрастание численности мелкоразмерных видов зеленых водорослей: до 20 % в 2003 г. и до 70 % в 2008 г. – в оз. Окуневом; до 25 % в 2003 г. и до 90 % в 2008 г. – в оз. Поппалиярви. В оз. Окуневом преобладали виды водорослей из класса хлорококковых (р. *Monoraphidium*), а в оз. Поппалиярви – из класса вольвоксовых (р. *Phacotus*).

Таблица 1. Межгодовая изменчивость численности и биомассы суммарного фитопланктона и диатомовых водорослей в озерах системы р. Кенти в 1987–2008 гг.

Озеро	Год	Диатомовые		Суммарная	
		Численность	Биомасса	Численность	Биомасса
Окуневое	1987	52,1	0,073	195,8	0,178
	1994	132,5	0,096	398,0	0,448
	2003	13,8	0,013	113,5	0,139
	2008	122,5	0,076	442,5	0,113
Поппалиярви	1987	1211,2	0,809	1354,3	0,942
	1994	44,1	0,058	87,4	0,127
	1996	102,5	0,063	402,5	0,32
	2003	50,0	0,037	230,0	0,401
	2008	90,0	0,081	2455	1,845
Койвас	1987	587,0	0,550	664,9	0,675
	1994	54,9	0,067	200,0	0,408
	1996	23,8	0,0206	227,5	0,164
	1999	46,0	0,036	156,0	0,100
	2003	17,5	0,003	167,5	0,174
	2008	65,0	0,026	185,0	0,157
Кенто	1987	93,0	0,150	224,8	0,246
	1994	33,7	0,045	161,7	0,267
	1996	17,9	0,012	101,7	0,283
	2003	37,5	0,044	75,0	0,197
	2008	120,0	0,066	287,5	0,246

Таким образом, за 20 лет наблюдений видовой состав фитопланктона озер системы р. Кенти принципиальных изменений не претерпел,

основу флористического списка, как и в прежние годы, составляют диатомовые, зеленые и золотистые водоросли. Отмечены изменения в соотношениях количественных характеристик систематических групп фитопланктона, которые свидетельствуют о начавшейся перестройке в сообществах озер. Эти изменения вызваны усилением антропогенного воздействия на экосистемы водоемов, в частности, вследствие повышения содержания калия, общего фосфора и азота в воде, а также общего уровня минерализации.

Зоопланктон. Представители сообщества зоопланктона проявили резко различающуюся реакцию на поступление техногенных вод в озера системы Кенти. За период исследований (1981–2001 гг.) в составе зоопланктона водоемов системы р. Кенти выявлено 69 таксонов, в том числе Cladocera – 27, Copepoda – 18, Rotatoria – 24. В 1981 г., до начала работы комбината, численность и биомасса зоопланктона в озерах системы р. Кенти варьировали в пределах 4,5–61,3 тыс. экз./м³ и 0,15–6,06 г/м³. Основной фон практически во всех озерах создавался за счет коловраток *Asplanchna* sp., *Kellicottia longispina* (Kellicott 1879), а также таких рачков, как *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863), *Daphnia cristata* Sars 1862, *Bosmina kessleri* (Uljanin 1872), *Bosmina obtusirostris* Sars 1862. В качестве субдоминантов были отмечены *Mesocyclops leuckarti* (Claus 1857) и *Cyclops scutifer* Sars 1863. Практически на всех станциях были обнаружены *Bipalpus hudsoni* (Imhof 1891), *Eudiaptomus gracilis* Sars 1863, *Heterocope appendiculata* Sars 1863, *Holopedium gibberum* Zaddach 1855, *Leptodora kindtii* (Focke 1844) и *Polyphemus pediculus* (Linne 1778). Их численность варьировала в пределах 10–1000 экз./м³. На большинстве станций присутствовал *Bythotrephes longimanus* Leydig 1860, численность которого не превышала 10 экз./м³. Все обнаруженные виды входят в состав комплекса видов зоопланктона, типичных для водоемов северо-западного региона Карелии.

Начиная с 1992 г. в верхних озерах системы р. Кенти в катионном составе стали преобладать ионы калия, среди анионов – сульфаты [Лозовик, Калмыков, 2007]. К 2001 г. в озерах Окуневом, Куроярви и Поппалиярви (верхнее течение р. Кенти) численность и биомасса зоопланктона снизились в 10–100 раз и составили, соответственно, 0,5–4,5 тыс. экз./м³ и 0,012–0,16 г/м³. Отмеченная обратная связь между суммой ионов и численностью, биомассой зоопланктона в озерах Окуневом, Поппалиярви (коэффициенты корреляции от –0,8 до –0,9,

достоверные при $p < 0,01$) указывает на их тесную зависимость от степени загрязнения озер.

Различные виды зоопланктона проявили противоположную реакцию на минеральное загрязнение: одни виды исчезали из озер при небольших уровнях загрязнения, другие – повышали свою численность. Объяснить причины разной реакции видов зоопланктона на минеральное загрязнение можно, если обратиться к истории формирования их адаптаций в пресных водах, т. е. применить эволюционный подход. Согласно гипотезе о разных сроках вселения гидробионтов в пресные воды [Alekseev, Starobogatov, 1996], виды делятся на давно вселившиеся в пресные воды (палеолимнические), в более поздние сроки (мезолимнические) и относительно недавно (неолимнические). По мере освоения пресных вод виды заселяли сначала глубоководные озера с постоянным газовым, солевым и температурным режимом, затем небольшие озера и, наконец, пересыхающие мелкие водоемы. При этом у пресноводных видов вырабатывались все более глубокие адаптации к переживанию действия неблагоприятных факторов, свойственных временным водоемам (пересыхание, промерзание). Наибольшая степень адаптации характерна для палеолимнических форм, способных выживать даже в пересыхающих лужах. Адаптации к высыханию водоемов, нестабильности температурного и солевого режимов, наличию вредных газов (сероводород) мы рассматриваем как преадаптации к антропогенному фактору [Калинкина, Куликова, 2009].

По мере нарастания минерального загрязнения в водоемах системы р. Кенти первыми исчезли представители мезолимнической группы – виды семейств Cercopagidae, Leptodoridae, Holopedidae (табл. 2). Они никогда не встречаются во временных водоемах и не выводятся из сухих илов. Вследствие относительно недавнего вселения в пресные воды эти виды населяют только глубоководные непересыхающие водоемы и формирует латентные яйца, которые не способны выживать в условиях замерзания и пересыхания водоемов.

Виды палеолимнических семейств (Diptomidae и Temoridae) – *E. gracilis* и *H. appendiculata* – исчезали из озер при существенно более высоких уровнях минерального загрязнения, чем предыдущие. Наибольшую устойчивость к минеральному загрязнению в изучаемых водоемах демонстрируют палеолимнические семейства ракообразных Daphniidae, Bosminidae, Cyclopidae, а также представители класса Rotatoria, имеющие пресноводное происхождение [Кутикова, 1970].

Таблица 2. Численность различных групп зоопланктона в оз. Поппальярви в 1981–2001 гг., тыс. экз./м³

Группа	1981	1984	1987	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1999	2000	2001
Rotatoria	12,1	11,4	2,1	0,08	0,2	0,8	0,2	4,4	0,1	0,01	0,03	0,02
Cyclopidae	12,1	24,1	2,2	0,06	1,1	0,7	4,1	2,6	1,5	0,3	0,1	0,7
Daphniidae	5,3	6,0	2,8	3,5	0,5	3,0	1,3	0,1	0,5	0,07	0,2	0,03
Bosminidae	22,1	1,9	3,8	0,2	0,5	0,6	0,08	34,4	1,7	0,2	0,1	0
Diaptomidae	0,1	1,2	0,3	7,4	1,4	0,9	0,06	0,04	0,01	0	0	0
Temoridae	0,2	0,1	0,3	0,4	0,03	0	0	0	0	0	0	0
Holopedidae	0,04	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptodoridae	0	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polyphemidae	0	0,03	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0
Sididae	0,03	0,7	0,02	0,4	0,04	0,04	0	0,1	0,01	0	0	0
Cercopagidae	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chydoridae	0	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Науплии Cyclopoida	0,2	0,4	0	0,04	0,01	0	0,02	0,5	0,05	0,02	0	0,2
Науплии Calanoida	0,3	0,5	0,6	0,4	0,2	0,1	0,2	0,9	0,2	0,03	0,01	0,1
Общая численность	52,5	46,5	12,4	12,5	4,0	6,4	5,9	43,0	4,1	0,6	0,4	0,6

Макрозообентос. Структура озерных бентоценозов системы р. Кенти по материалам 1980–1981 гг. была типична для большинства озер бассейна р. Кеми. В составе донной фауны были отмечены 95 таксонов различного ранга из 24 систематических групп. Руководящее ядро бентоценозов формировали три основные группы – Chironomidae, Oligochaeta и Mollusca [Рябинкин, 2003]. Численность и биомасса сообществ макрозообентоса варьировали в пределах 1,2–2,3 тыс./м² и 0,69–2,73 г/м².

Техногенные воды Костомукшского ГОКа, поступающие в водоемы озерно-речной системы Кенти, оказали существенное влияние на видовой состав, структурные и количественные параметры популяций бентоценозов (табл. 3). В результате поступления высокоминерализованных вод количество видов макробентоса сократилось вдвое – с 116 в 1980–1985 гг. до 57 в 1992–1994 гг. В частности, видовое разнообразие Chironomidae – наиболее хорошо изученной в систематическом отношении группы, доминирующей в бентоценозах всех озер системы, – сократилось с 51 вида в 1981 г. до 14 в 2008 г. В последние годы в верхних озерах системы, в

большой степени испытывающих влияние сточных вод, доминирующее положение занимают эврибионтные виды хирономид рода *Procladius* (*P. ferrugineus*, *P. choreus*) – от 25,0 % (оз. Поппальярви) до 36,2 % (оз. Окунево) от общей численности. По мере нарастания минерального загрязнения в бентоценозах заметно возрастает доля Mollusca. По численности она составляла: в 1981 г. – 6 %, в 1987 – 8, в 1994 г. – 39, 1997–1999 гг. – 49, в 2000 г. – 47%, по биомассе, соответственно, в 1981 г. – 22 %, в 1987 – 29, в 1994 г. – 62, 1997–1999 гг. – 64, а в 2000 г. – 71 %. Вместе с тем сокращалась доля Oligochaeta вплоть до полной их элиминации в озерах Окунево и Поппальярви.

Токсикологические эксперименты. Вода хвостохранилища характеризуется специфическим составом, а именно, чрезвычайно высоким содержанием калия (до 150 мг/л) при относительно низких концентрациях натрия, кальция и магния (10–20 мг/л). В неразбавленной воде гибель *G. fasciatus* произошла в первый же день опыта, что позволяет оценить воду хвостохранилища для этого вида как высокотоксичную. В двукратном разведении тех-

Таблица 3. Межгодовая динамика средних количественных и структурных характеристик макрозообентоса озер системы р. Кенти

Год	N	B	%N _{Ch.}	%N _{Oi.}	%N _{Biv.}	H	J
1981	1633 ± 220	1,29 ± 0,19	49	13	7	4,86	72,63
1987	1663 ± 455	0,80 ± 0,17	67	6	7	3,97	68,14
1992	452 ± 54	0,38 ± 0,06	51	14	28	3,73	66,29
1993	797 ± 78	0,64 ± 0,09	58	21	14	3,56	66,39
1994	319 ± 41	0,39 ± 0,06	50	9	37	3,51	60,17
1995	836 ± 217	0,81 ± 0,26	50	2	13	3,35	63,73
1996	624 ± 69	1,15 ± 0,18	58	15	22	3,74	67,05
1997	359 ± 49	0,85 ± 0,12	35	6	48	2,75	52,23
1999	684 ± 48	1,49 ± 0,17	44	4	49	2,64	49,25
2000	722 ± 39	1,94 ± 0,14	48	2	47	2,22	42,16
2003	1232 ± 145	2,78 ± 0,78	56	2	38	2,87	56,76
2008	1304 ± 336	1,44 ± 0,25	61	0,1	30	3,05	71,24

Примечание. N – средняя численность, экз./м²; %N – относительная численность (Chironomidae, Oligochaeta, Bivalvia); B – средняя биомасса, г/м²; H – индекс Шеннона, бит/экз.; J – индекс выравненности, %.

ногенной воды рачки погибали на 4 сутки опыта. В 5-кратном и 10-кратном разведениях на 19 сутки выжило 50 % и 80 % рачков, соответственно. Выживаемость амфипод в контрольном варианте была 100 %. В отдельных опытах при суточной экспозиции для вида *G. fasciatus* были определены величины среднесмертельных концентраций (CL_{50}) основных катионов, содержащихся в техногенной воде. Величина CL_{50} ионов калия составила 103 (75–134) мг/л; ионов кальция – 1075 (793–1380) мг/л; ионов натрия – 1290 (930–1690) мг/л; ионов магния – 1630 (1190–2110) мг/л (концентрации даны в пересчете на катионы; в скобках указаны границы доверительного интервала). Следовательно, из всех катионов наиболее токсичными для *G. fasciatus* оказались ионы калия, основного компонента техногенной воды.

В более ранних исследованиях [Калинкина, 2010] было показано, что в 30-дневных опытах вода хвостохранилища не вызывает гибели дафний *Daphnia magna* Straus. Вид *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg оказался более чувствительным, чем вид *D. magna*. В 10-суточном опыте выживаемость цериодафний в неразбавленной воде хвостохранилища составила 40 %, в двукратном разбавлении – 60 %, в пятикратном – 67 %, в десятикратном – 87 %. Из трех видов ракообразных бокоплав *G. fasciatus* проявил наименьшую резистентность к действию техногенных вод Костомукшского комбината.

Таким образом, различные представители ракообразных в токсикологических опытах проявили широкий спектр реакций на действие воды хвостохранилища: от полного выживания (вид *D. magna*) до быстрой гибели (вид *G. fasciatus*). Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами полевых наблюдений, которые свидетельствуют о глубоких перестройках водных сообществ за счет вымирания чувствительных и выживания резистентных видов.

Выводы

1. Наибольшая устойчивость к минеральному загрязнению характерна для фитопланктона, в котором возросла доля мелкоразмерных видов водорослей (зеленых, динофитовых, синезеленых). Представители сообществ зоопланктона и зообентоса проявили широкий спектр реакций на поступление техногенных вод Костомукшского ГОКа. Одни виды исчезали при незначительном уровне загрязнения, другие – находили благоприятные условия для развития даже при высоких концентрациях калия (основного компонента техногенных вод).

2. Толерантность различных видов зоопланктона к минеральному загрязнению связана с историей их становления в пресноводных экосистемах. В изученных водоемах выживали палеолимнические виды, историческая адаптация которых к условиям жизни во временных континентальных водоемах послужила базой их высокой устойчивости к минеральному загрязнению. Отсутствие этих адаптаций у мезолимнических видов не позволило выдержать экстремально высокое антропогенное воздействие, что привело к их исчезновению.

3. Разнонаправленная реакция водных организмов на действие техногенных вод, наблюдаемая в полевых исследованиях, нашла подтверждение в токсикологических экспериментах. Наиболее устойчивым оказался вид *Daphnia magna*, который выживал в техногенных водах в течение месяца. Меньшую устойчивость проявил вид *Ceriodaphnia affinis*, выживаемость которого в техногенной воде составила 40 %. Рачки *Gmelinoides fasciatus* погибали в воде хвостохранилища в течение суток, что позволяет охарактеризовать ее как высокотоксичную для данного вида.

Выражаем благодарность В. В. Аглетдинову за помощь при проведении биотестирования техногенных вод Костомукшского ГОКа.

Литература

- Березина Н. А., Панов В. Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро // Зоол. журн. 2003. Т. 82, № 6. С. 731–734.
- Вислянская И. Г. Фитопланктон // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 112–155.
- Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Эволюционная обусловленность реакции гидробионтов на изменение ионного состава воды (на примере пресноводного зоопланктона) // Изв. РАН. Серия биологическая. 2009. № 2. С. 243–248.
- Калинкина Н. М. Использование тест-объекта *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg при биотестировании техногенных вод горнорудного производства // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. С. 48–52.
- Коросов А. В., Калинкина Н. М. Количественные методы экологической токсикологии. Методическое пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. 53 с.
- Кутикова Л. А. Коловратки фауны СССР (Rotatoria). Л.: Наука, 1970. 744 с.
- Лозовик П. А., Калмыков М. В. Химический состав воды озерно-речной системы р. Кенти // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 106–112.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Отв. ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовской. М.: Наука, 1975. 240 с.

Рябинкин А. В. Макрозообентос водоемов бассейна р. Кеми (Карелия) и его динамика в условиях антропогенного влияния: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2003. 25 с.

Строганов Н. С. Методика определения токсичности водной среды // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 14–60.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Калинкина Наталия Михайловна

зав. лабораторией гидробиологии, д. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: kalina@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Чекрыжева Татьяна Александровна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Tchekryzheva@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Куликова Тамара Павловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
тел.: (8142) 576520

Рябинкин Александр Валентинович

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Sorbus08@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Чекрыжева Т. А. Фитопланктон озер системы р. Кенти // Влияние техногенных вод горнообогатительного комбината на водоемы системы р. Кенти. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1995. С. 68–79.

Alekseev V. R., Starobogatov Ya. I. Types of diapause in Crustacea: definition, distribution, evolution // Hydrobiologia. 1996. Vol. 320. P. 15–26.

Kalinkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kalina@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Chekryzheva, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Tchekryzheva@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Kulikova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576520

Ryabinkin, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Sorbus08@mail.ru
tel.: (8142) 576520

УДК 556.114.7: 556.55

РОЛЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Н. А. Белкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Дана количественная оценка накопления и трансформации органических веществ и биогенных элементов в озерных донных отложениях на примере осадков 100 озер Карелии. Установлено, что аккумуляция органического вещества и азота органического в донных отложениях соответствует трофическому статусу водоема и закономерно увеличивается от олиготрофного типа к эвтрофному, тогда как в распределении фосфора не наблюдается отличий. Поглощение кислорода донными отложениями и интенсивность потоков на границе вода – дно также зависят от уровня трофии водоемов.

Ключевые слова: донные отложения, органическое вещество, биогенные элементы.

N. A. Belkina. ROLE OF SEDIMENTS IN THE PROCESSES OF TRANSFORMATION OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN LAKE ECOSYSTEMS

The quantitative assessment of accumulation and transformation of organic substances and nutrients in lake sediments was carried out through comparative analysis of data on 100 lakes of Karelia. We found that accumulation of organic matter and nitrogen in the sediments agrees with the trophic status of the lake, and naturally increases from the oligotrophic to the eutrophic type, whereas no differences were observed in the distribution of phosphorus. Oxygen absorption by sediments and the intensity of the flux at the water-sediments boundary depends on the trophic status of the lake.

Key words: sediments, organic matter, nutrients.

Введение

Донные отложения являются природной биогеохимической барьерной зоной, играющей важную роль в процессах передачи вещества и энергии в водных экосистемах. Донные осадки формируются в результате оседания на дно водоема твердых частиц разного генезиса. В процессе седиментации эти частицы подвергаются сложному совокупному воздействию физических, химических и биологических факторов, действие которых продолжается и после

осаждения частиц на дно. Основная роль донных отложений в экосистеме водоема сводится к изъятию вещества из воды вследствие его седиментации и возврату определенной части этого вещества в водоем в результате диагенетических процессов в минеральных формах. Иными словами, донные отложения, с одной стороны, избавляют экосистему водоема от избытка органического вещества, с другой стороны, поставляют ресурсы, необходимые продуцентам.

Определяющую роль в функционировании экосистемы водоема играют химические

элементы, входящие в состав живого вещества (С, N, P, O). Наиболее важными процессами, протекающими в донных отложениях и оказывающими влияние на состояние экосистемы, являются процессы разложения органического вещества, потребления кислорода и поступления биогенных элементов в водную массу озера. В отличие от водного раствора реакции в осадках протекают медленно, в связи с более низкими температурами и гетерогенностью системы равновесие устанавливается не сразу, а за более длительный промежуток времени. На трансформацию вещества в донных отложениях оказывают влияние физико-географические условия среды осадкообразования, скорость осадконакопления, минералогический и химический состав абиогенного материала, количественный и качественный состав органического вещества, поступающего в донные отложения, и деятельность донных организмов, участвующих в процессе его трансформации.

Целью данной работы является установление закономерностей процессов накопления и трансформации органического вещества и биогенных элементов в донных отложениях разнотипных озер Карелии.

Объекты и методы исследования

В работе использованы данные коллекции ИВПС КарНЦ РАН (1965–2009 гг.) по химическому составу донных отложений 98 озер Карелии с площадью более 1 км² и до 100 км², а также больших озер – Онежского и Ладожского. Особенности накопления органического вещества (ОВ) и биогенных элементов в донных отложениях изучались на водоемах, отличающихся трофическим статусом, гидрологическими и морфометрическими характеристиками, разными покровными породами и площадями водосборов.

Отбор проб донных отложений осуществлялся поршневой трубкой (модифицированный вариант стратометра Алексона [Håkanson, Jansson, 1983]). В пробах измерялись величины pH и Eh [Семенов, 1977], толщина окисленного слоя оценивалась визуально. В образцах натуральной влажности определялись: естественная влажность, пористость и удельная масса [Аринушкина, 1970], потребление кислорода илом (ПК) (экспозиция в течение суток, скляночный метод), аммонийный азот, железо общее, марганец и минеральный фосфор ($P_{\text{лаб}}$ – экстракция из сухого грунта персульфатом аммония и $P_{\text{мин}}$ – экстракция из влажного грунта в кислой среде), растительные пигменты (Chl a, b, c) и феофитин. В воздушно-сухих об-

разцах – потери при прокаливании (П.П.П.), азот органический ($N_{\text{орг}}$) (метод Кьельдаля) и фосфор общий ($P_{\text{общ}}$), органический углерод ($C_{\text{орг}}$) [Аринушкина, 1970].

Оценку потребления кислорода донными отложениями Ладожского и Онежского озер (где концентрация кислорода в придонном слое воды почти не меняется в течение года), наряду с указанным выше методом, также проводили расчетным методом: $F = -(D_0 \cdot k \cdot C_0 \cdot z^2) \ln(C_z \cdot C_0^{-1}) + V \cdot C_0$, где F – поток кислорода в донные отложения, D_0 – коэффициент диффузии O_2 , k – пористость, z – мощность окисленного слоя, C_0 и C_z – концентрации O_2 на поверхности и на глубине z , V – скорость осадконакопления [Мизандронцев, 1990].

Поступление вещества из донных отложений в воду (внутренняя нагрузка) было рассчитано балансовым методом [Игнатьева, 2002]: $J = J_s - J_b$, $J_i = C_i \cdot M_{\text{уд}} \cdot V$, где J_s – поток седиментации; J_b – поток захоронения; C_i – концентрация элемента в донных отложениях (для J_s – в поверхностном, для J_b – на глубине ~10 см); $M_{\text{уд}}$ – удельная масса осадка; V – скорость осадконакопления. Последнюю вычисляли по формуле: $V = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^2 \cdot \mu^{-1} \cdot 18^{-1}$, где ρ_s , ρ – плотность донных отложений и воды, соответственно; d – размер частиц, $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; μ – вязкость воды [Håkanson, Jansson, 1983].

Удерживающая способность донных отложений оценивалась по относительному изменению концентрации элемента с глубиной R : $R = (C_0 - C_z)/C_0$ и коэффициенту аккумуляции K : $K = C_z/C_0$.

Скорость аэробной деструкции ОВ в поверхностном слое донных отложений определялась по уравнению распада ОВ планктона в кислородных условиях (на 106 атомов С требуется 138 молекул O_2) [Драйвер, 1985].

Результаты и обсуждение

Донные отложения озер Карелии в основном представлены тремя типами осадков: песчано-гравийными, отлагающимися в зоне литорали, глинистыми грунтами и илами (преобладающий тип). Донные отложения зон аккумуляции исследованных озер в основном относятся к минеральным илистым осадкам со средним содержанием в них: $C_{\text{орг}}$ – 12 %, $N_{\text{орг}}$ – 1 %, $P_{\text{общ}}$ – 0,19 %, Fe – 2 %, Mn – 0,4 % (здесь и далее химический состав рассчитан на воздушно-сухой вес осадка). Сопоставление данных для водоемов разного трофического уровня показало, что накопление ОВ и $N_{\text{орг}}$ в донных отложениях соответствует трофическому статусу озер и закономерно увеличивается от олиготрофно-

го типа к эвтрофному (табл. 1). Максимальное содержание ОВ обнаружено в высокогумусных водоемах эвтрофного типа с гидрокарбонатным классом вод группы кальция. Такая картина наблюдается в темно-зеленых детритных илах мелководных озер, к примеру, оз. Сарозеро, где содержание $C_{орг}$ достигает 28 %, $N_{орг}$ – 2 %. Минимальное содержание ОВ в донных отложениях обнаружено в олиготрофных мезогумусных слабощелочностных слабокислых озерах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция и натрия. К примеру, в оз. Сундозеро $C_{орг}$ – 1,3 %, $N_{орг}$ – 0,1 %.

Таблица 1. Средние значения содержания ОВ и биогенных элементов в иловых отложениях озер Карелии, %

Тип водоема	Число озер	$C_{орг}$	ОВ	$N_{орг}$	$N_{NH_4^+}$	$P_{лаб}$	$P_{общ}$
Олиготрофные	23	8	18	0,7	0,03	0,04	0,22
Мезотрофные	48	12	22	1,0	0,03	0,04	0,17
Эвтрофные	27	15	28	1,4	0,03	0,04	0,22

Отличий в распределении $P_{лаб}$ и $P_{общ}$ в озерах разной трофии не наблюдается. Причиной этого, вероятно, является высвобождение и поступление обратно в воду фосфатов, сорбированных на гидроксидах Fe(III), которые в бескислородных условиях восстанавливаются до подвижных форм Fe(II).

Органические вещества, приносимые с водосбора и образующиеся в самом водоеме в результате жизнедеятельности животных и растительных организмов, прежде чем поступить в донные отложения, подвергаются различным физико-химическим и биологическим превращениям в водной толще. Степень трансформации определяется рядом абиотических (гидро-

логических, геологических, гидрохимических) и биотических факторов. Взвеси, поступающие в донные отложения эвтрофных озер, судя по составу поверхностного 0–3 мм слоя осадка, отличаются высоким содержанием ОВ и биогенных элементов по сравнению с поверхностными взвесями мезотрофных озер (табл. 2). Доля $P_{мин}$ составляет 50–80 % от $P_{общ}$, а концентрации железа и марганца изменяются в пределах от 5 до 6,5 % и 0,3–0,4 %, соответственно, за исключением оз. Шотозеро (Fe – 1,9 %) и оз. Укшезеро (Mn – 0,8 %).

Содержание ОВ в поверхностном турбидированном «живом» слое донных отложений (0–5 см) эвтрофных озер было закономерно выше, чем в осадках мезотрофных озер (табл. 2). Растительные пигменты были представлены в основном продуктом разрушения хлорофилла – феофитином (рис. 1). Максимальные концентрации ОВ, биогенных элементов, растительных пигментов ($\Sigma Chl a, b, c$ 700–420 мкг/г), высокие значения потребления кислорода (1,8–2,8 мг O_2 /г в сутки) и самые низкие величины рН (5,5–5,7) были зафиксированы в донных отложениях эвтрофных озер Вохтозеро и Пелдожское, а минимальные – в оз. Шотозеро (П.П.П. – 9,9 %, $\Sigma Chl a, b, c$ 67 мкг/г, ПК 0,3 мг O_2 /г в сутки). Удерживающая способность донных отложений в слое 0–5 см различается мало по отношению к углероду, азоту и фосфору для эвтрофных и мезотрофных озер. В то же время более глубокие слои (14–15 см) донных отложений эвтрофных озер показали большую удерживающую способность к этим элементам по сравнению с осадками мезотрофных водоемов (табл. 2). Наименьшей удерживающей способностью (минимальные значения K

Таблица 2. Содержание $C_{орг}$, П.П.П. и биогенных элементов (%) в донных отложениях, коэффициент аккумуляции (K), удерживающая способность осадков (R)

Озеро	см	$C_{орг}$			П.П.П.			$P_{мин}$			$P_{общ}$			$N_{орг}$		
		%	K	R	%	K	R	%	K	R	%	K	R	%	K	R
Пелдожское	0–0,3	14,9			37,0			0,36			0,43			1,22		
	0–5	13,9	0,9	0,07	35,3	0,9	0,05	0,32	0,9	0,14	0,40	0,9	0,07	0,95	0,8	0,22
	20–21	11,8	0,8	0,21	33,0	0,9	0,11	0,30	0,8	0,17	0,48	1,1	-0,12	0,61	0,5	0,50
Вохтозеро	0–0,3	17,9			41,8			0,17			0,47			1,05		
	0–5	14,2	0,8	0,21	39,4	0,9	0,06	0,15	0,9	0,13	0,24	0,5	0,49	1,08	1,0	-0,03
	14–15	16,2	0,9	0,09	37,8	0,9	0,10	0,11	0,6	0,35	0,21	0,3	0,55	0,99	0,9	0,06
Укшезеро	0–0,3	4,0			15,0			0,13			0,22			0,18		
	0–5	3,5	0,9	0,12	12,8	0,9	0,14	0,13	1,0	0,00	0,23	1,05	-0,05	0,27	1,5	-0,50
	14–15	3,4	0,8	0,15	11,4	0,8	0,24	0,06	0,5	0,54	0,08	0,4	0,63	0,32	1,8	-0,78
Вендюрское	0–0,3	11,5			31,7			0,10			0,15			0,73		
	0–5	10,8	0,9	0,06	30,1	0,9	0,05	0,08	0,8	0,20	0,11	0,7	0,27	0,68	0,9	0,07
	13–14	2,2	0,2	0,81	12,4	0,4	0,61	0,04	0,4	0,60	0,04	0,3	0,73	0,27	0,4	0,63
	27–30	2,6	0,2	0,78	7,54	0,2	0,76	0,06	0,6	0,40	0,06	0,4	0,60	0,28	0,4	0,62
Шотозеро	0–0,3	6,2			12,5			0,07			0,13			0,15		
	0–5	5,0	0,8	0,19	9,9	0,8	0,21	0,08	1,1	-0,14	0,10	0,8	0,23	0,14	0,9	0,07
	14–15	4,3	0,7	0,30	7,1	0,6	0,43	0,06	0,9	0,14	0,08	0,6	0,38	0,10	0,7	0,33

и максимальные величины R) обладают донные отложения оз. Вендюрского, что также проявилось в образовании рудного прослоя, обогащенного железом и марганцем в области Eh-барьера. Скорости трансформации ОВ и величины потоков биогенных элементов из донных отложений в воду для эвтрофных озер были в 2–10 раз выше, чем для мезотрофных (табл. 3).

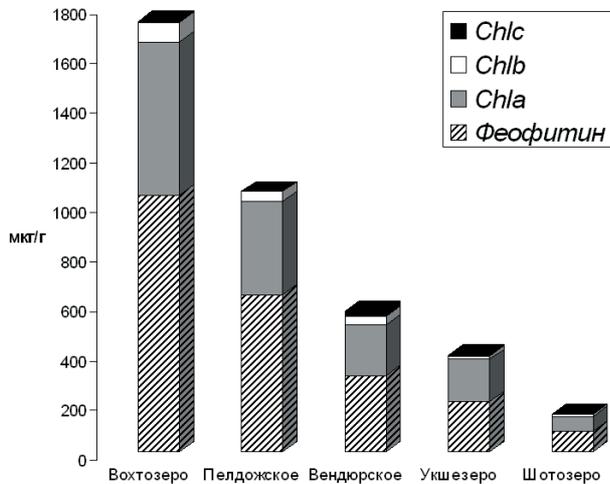


Рис. 1. Растительные пигменты в донных отложениях (0–5 см)

Таблица 3. Скорости минерализации органического вещества (С) в донных отложениях и поступление биогенных элементов (N, P) из иловых осадков в воду, скорость осадконакопления (V)

Озеро	C	N	P	V
	мг · м ⁻² в сутки			мм · год ⁻¹
Вохтозеро	54	39	31	2
Пелдожское	100	12	–	2
Вендюрское	6	5	2	0,6
Укшезеро	5	2	3	0,5
Шотозеро	6	0,4	0,4	0,2

Условия формирования донных отложений отдельных районов больших озер, прежде всего, определяются морфологией озерной котло-

вины и объемом водной массы. Так, для Онежского озера седиментогенез в Центральном и Большом Онего контролируется механическим (гидродинамическим) барьером. По данным Н. И. Семеновича [1973], органическое вещество, оседающее на дно, переносится здесь с пелитовой фракцией (<0,01 мм). Повенецкий залив представляет собой как бы самостоятельный водоем, где принос терригенного материала очень мал. В заливах озера широко распространены илистые осадки. Для Петрозаводской губы определяющим фактором при формировании донных отложений является взвешенный сток р. Шуи. В Кондопожской губе, особенно в вершинной ее части, велик вклад антропогенной составляющей. В этом заливе состав взвесей и состав донных отложений меняется по мере удаления от ЦБК (табл. 4). В донных отложениях в вершинной части губы на площади 5 км² в результате поступления техногенных органических продуктов со сточными водами Кондопожского ЦБК накопилось около 200 тыс. т органических веществ. Особенности химического состава осадков, характера накопления и трансформации органических веществ донных отложений позволили условно разделить акваторию губы на три части: вершинную (I) и переходную зоны (II), а также центральный глубоководный район (III). Осадки I зоны отличаются низкими значениями Eh (до –189 мВ) и рН (до 5,2), количественным и качественным составом ОВ. Содержание $C_{орг}$ в поверхностном 5 см слое отложений достигает 38 %, $N_{орг}$ – 1 %, фенолов – 55 мг · г⁻¹, лигносульфонатов – 600 мг · г⁻¹. В этой зоне наблюдаются величины ПК до 39 мг O_2 · г⁻¹ · сут⁻¹, отношения C : N до 44 и C : P до 400, а также наибольшие скорости поступления минеральных веществ из донных отложений в воду (1,3 г · м⁻² · сут⁻¹). ОВ донных

Таблица 4. Химический состав поверхностных взвесей (0–0,3 см) донных отложений Онежского озера (средние значения)

Район	H, м	Eh, мВ	pH	Влаж.	$C_{орг}$	П.П.П.	N-NH ₄	$N_{орг}$	Fe	Mn	P _{мин}	P _{общ}
Большое Онего	40	363	5,9	89	5,6	8,2	0,063	0,40	5,8	1,26	0,15	0,23
	100	431	6,2	92	4,9	19,7	0,022	0,40	5,6	1,58	0,14	0,20
Центральное Онего	60	458	6,8	95	4,9	18,6	0,006	0,26	3,9	0,80	0,12	0,20
	100	572	6,5	91	4,0	13,7	0,004	0,26	5,3	0,61	0,14	0,21
Повенецкий залив	100	572	6,5	91	4,0	13,7	0,004	0,26	5,3	0,61	0,14	0,21
Заонежский залив	26	509	6,5	89	2,2	11,8	0,004	0,33	5,4	0,73	0,12	0,14
Челмужская губа	9	145	6,6	93	3,4	11,3	0,005	0,30	5,5	0,30	0,12	0,19
Великая губа	10	265	7,0	92	5,1	17,2	0,004	0,36	4,5	0,33	0,16	0,19
Лижемская губа	46	458	7,4	93	4,7	18,5	0,009	0,36	5,4	1,42	0,11	0,19
Уницкая губа	27	502	6,7	93	4,2	16,4	0,003	0,18	5,8	1,44	0,10	0,17
Петрозаводская губа	20	303	6,7	90	4,7	14,8	0,031	0,28	5,1	0,96	0,16	0,21
Кондопожская губа												
1 км от ЦБК	15	–40	6,5	95	17,3	48,1	0,166	0,85	2,8	0,41	0,13	0,19
4 км от ЦБК	30	82	6,6	94	15,7	35,1	0,179	1,01	3,3	0,33	0,18	0,27
16 км от ЦБК	80	613	6,6	95	6,8	23,2	0,003	0,26	6,2	1,21	0,32	0,31
26 км от ЦБК	34	406	6,8	93	5,6	19,9	0,062	0,33	5,7	0,91	0,15	0,22

отложений зоны II формируется главным образом за счет седиментации мелкодисперсных взвесей сточных вод, прошедших биологическую очистку и обогащенных N, P и S. В этом районе в поверхностном 5 см слое донных отложений отмечены высокие концентрации $N_{орг}$ (до 1 %), $P_{общ}$ (до 0,3 %), $S_{общ}$ (до 0,7 %), Fe (до 7 %) и Mn (до 4 %), растительных пигментов (до $500 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$). В илах центрального глубоководного района Кондопожской губы (зона III) вследствие непрерывного накопления в них веществ автохтонного происхождения и трансформированных техногенных взвесей в настоящее время увеличиваются концентрации C, P и Fe [Васильева, 1986, 1990; Белкина, 2005].

Поверхностные взвеси в других районах Онежского озера имеют окисленный характер, большая часть фосфора находится в минеральной форме (>60 %) (табл. 4). Состав взвесей центральных глубоководных районов отличается более высоким содержанием азота органического. Для донных отложений Онежского озера в отличие от малых водоемов в целом характерно то, что наиболее интенсивно процессы разложения ОВ протекают в присутствии кислорода в зоне контакта осадка с надилловой водой. Коэффициент удержания C, N, P в поверхностном «живом» слое донных отложений составляет ~0,5. Так, для донных отложений Петрозаводской губы содержание ОВ и $N_{орг}$ в поверхностной взвеси центрального района (глубина 27 м) превышало его содержание в слое донных отложений 0–1 см в 2 раза, а фосфора – в 1,5. В то же время для техногенных накоплений Кондопожской губы, где процесс разложения ОВ в основном происходит в анаэробных условиях, коэффициент удержания достигал значения 0,5 только на глубине осадка 40 см (рис. 2).

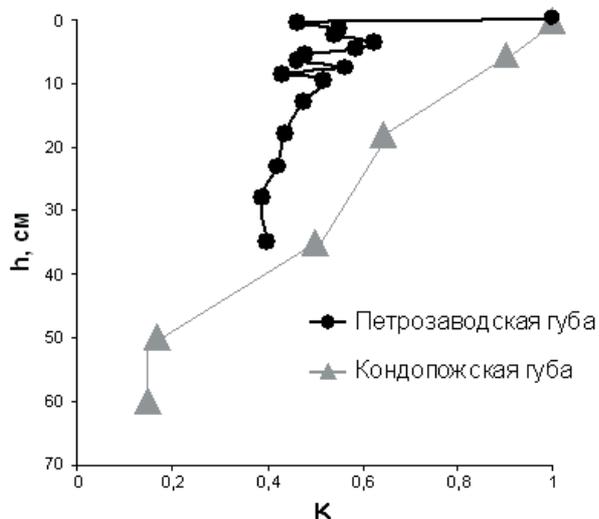


Рис. 2. Изменение коэффициента удержания ОВ с глубиной в донных отложениях Петрозаводской губы и Кондопожской губы

Процессы преобразования ОВ донных отложений требуют кислорода, источником которого являются придонные воды. Глубина проникновения растворенного кислорода в донные отложения зависит от ряда противоположно действующих факторов, среди которых наиболее существенными являются: концентрация кислорода в придонном слое воды, гранулометрический и химический состав осадков, температура, скорость осадконакопления, гидрофизические условия придонного слоя воды, численность и активность бактерий и донных беспозвоночных [Мизандронцев, 1990]. Например, для открытой части Ладожского озера мощность окисленного слоя (h_{oxic}) лежит в диапазоне от 1,5 до 4 см и увеличивается с глубиной для деклинальной и профундальной зоны и уменьшается – для ультрапрофундальной. Мощность h_{oxic} отложений в зоне развития сильных течений изменяется от 0,1 до 5 см. Мощность окисленного слоя илов, накапливающихся во впадинах залива Большое Онего (глубина залегания 100 м), варьировала от 1 до 9 см. Для района Петрозаводского Онего, обладающего ровным рельефом, слой грубозернистых осадков мощностью 3–5 см, покрывающий ледниковые и послеледниковые глины, является окисленным. В Центральном Онего, где накапливаются илистые осадки, $h_{oxic} = 5–16$ см. Причиной такого разброса, возможно, являются как морфометрические особенности дна исследуемых районов озер и динамическая активность их водных масс, так и размер частиц (чем крупнее частицы осадка, тем легче и глубже проникает в него кислород). В зонах максимальных скоростей осадконакопления (как правило, это прибрежные районы, испытывающие антропогенное воздействие) h_{oxic} минимальна. Например, в районе городов Питкяранты и Сортавалы (Ладожское озеро) в июне величина h_{oxic} составляла 0,5 см и 0,1 см, соответственно. В местах наибольшего загрязнения, где отмечается появление локальных анаэробных зон, h_{oxic} , по-видимому, меняется по сезонам года. Отсутствие окисленного слоя было обнаружено в Кондопожской губе (Онежское озеро) на площади дна 5 км^2 в районе выпуска сточных вод ЦБК. По мере удаления от комбината h_{oxic} увеличивалась [Белкина, 2005; Белкина и др., 2006].

Величина h_{oxic} также зависит от скорости аэробной деструкции ОВ. Максимальные значения суточного ПК в поверхностном слое донных отложений получены в северной части Ладожского озера в Сортавальском ($1,85 \text{ г O}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) и Питкярантском ($0,9 \text{ г O}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) заливах, а также на глубоководных станциях открытой части (до

2,24 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Среднее значение ПК для пелагиальных станций в 2 раза меньше, чем для заливов, и составляет 0,6 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. Для Онежского озера значения ПК колеблются в пределах от 0,05 до 2,8 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, наибольшие величины получены для техногенных осадков Кондопожской губы.

Максимальные значения потоков кислорода (F) в донные отложения, оцененные расчетным методом И. Б. Мизандронцева [1990] для стационарных условий, характерны для Сортавальского (до 2,76 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) и Питкярантского (0,63 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) заливов Ладожского озера. Невысокие значения F (0,05–0,06 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) получены для донных отложений, залегающих в зоне активного взаимодействия водных масс на выходе из этих заливов. Среднее значение F для станций, расположенных в пелагиали, составляет 0,08 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, тогда как величины F для центрального района озера несколько выше (0,1–0,2 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Минимальные их значения характерны для осадков гидродинамически активных зон озера (не больше 0,05 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Скорости деструкции ОВ в донных отложениях Ладожского озера имеют более высокие величины для заливов по сравнению со станциями пелагиали (табл. 5).

Таблица 5. Потребление кислорода илом (ПК), поток кислорода в донные отложения (F) и скорости деструкции органических веществ в донных отложениях северной части Ладожского озера (ДОВ₁ – рассчитанные из опытов ПК; ДОВ₂ – по величине F)

Район, глубина залегания	С : N	ПК	F	ДОВ ₁	ДОВ ₂
		г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г С $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г С $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$
Центральный район					
N = 100 м	6,3	0,14	0,10	0,04	0,03
N = 114 м	12,1	0,21	0,21	0,06	0,06
Глубоководная часть Северной Ладоги					
N = 115 м	8,5	0,86	0,08	0,24	0,02
N = 77 м	7,9	2,24	0,08	0,63	0,02
Питкярантский залив					
N = 24 м	10,7	0,93	0,63	0,26	0,18
Выход из Питкярантского залива					
N = 66 м	7,0	0,1	0,06	0,03	0,02
N = 70 м	5,5	0,8	0,08	0,22	0,02
Сортавальский залив					
N = 20 м	5,6	1,85	1,44	0,52	0,40
N = 19 м	5,9	1,41	2,76	0,40	0,77

Для Онежского озера, так же как и для Ладожского, наибольшие значения F получены для осадков, подвергающихся интенсивному антропогенному воздействию. В вершинной части Кондопожской губы значения F достигают 2,81 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. По мере удаления от комбината они уменьшаются и на выходе из губы близки к значениям для осадков откры-

того озера (для глубоководных станций залива Большое Онего – 0,12 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Для сравнения укажем, что в олиготрофном оз. Севан (до снижения его уровня) поглощение кислорода илами составляло 0,013–0,13 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ [Гамбарян, 1962], в центральной части оз. Эри в летние месяцы оно было равно 0,4–2,4 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ [Lucas, Thomas, 1971]. В работе F. R. Hayes, N. A. Mac Aulay [1959] приведены данные поглощения кислорода илами различных озер, составляющие 0,15–1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, в работах А. Н. Дзюбана [2010] – от 0 до 0,94 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. Как уже указывалось, потребление кислорода илами, полученное «скляночным» методом, для эвтрофных озер Вохтозеро и Пелдожское (2,0 и 2,3 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) выше, чем для мезотрофных озер Укшезеро и Шотозеро (0,8 и 0,4 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, соответственно). Опыты по потреблению кислорода донными отложениями эвтрофного оз. Пряжинского при экспозиции осадков под слоем азрированной воды дали значение 1,5 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Высокие значения потребления кислорода илом, как правило, соответствуют высоким значениям скорости минерализации ОВ и более высоким значениям потоков биогенных веществ из донных отложений. Так, скорости трансформации ОВ и поступление биогенных элементов из донных отложений в воду для эвтрофных озер были в 2–10 раз выше, чем для мезотрофных (табл. 5). Поступление биогенных элементов из донных отложений крупного олиготрофного озера, каким является Онежское, на порядок меньше, чем потоки, полученные для малых мезотрофных озер. Так, для илов центральных районов озера поступление азота изменялось от 0,05 до 0,3, а фосфора – от 0,02–0,08 мг $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. В районах, подверженных загрязнению, – Кондопожской и Петрозаводской губах – потоки были значительно больше (N – от 0,7 до 5, P – от 0,1 до 3 мг $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$).

Выводы

Накопление ОВ и азота органического в донных отложениях озер Карелии соответствует их трофическому статусу и закономерно увеличивается от олиготрофного к эвтрофному водоемам. Максимальное содержание ОВ обнаружено в высокогумусных водоемах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция, минимальное – в мезогумусных слабощелочных слабокислых озерах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция и натрия. В распределении фосфора в озерах разной трофии не наблюдается отличий.

Интенсивность обменных процессов на границе раздела вода – дно увеличивается с ростом трофического уровня водоема.

Основной процесс минерализации органического вещества в донных отложениях олиготрофного водоема происходит на границе вода – дно, для мезотрофного водоема – в поверхностном, окисленном слое донных отложений. Основная доля органического вещества в эвтрофном водоеме разлагается в анаэробных условиях.

Донные отложения оказывают значительное влияние на кислородный режим водоема. Поглощение кислорода донными отложениями зависит от трофического статуса водоема и колеблется от 0,01 до 0,1 г O₂ · м⁻² · сут⁻¹ для олиготрофных, от 0,1 до 1 г O₂ · м⁻² · сут⁻¹ для мезотрофных и более 1 г O₂ · м⁻² · сут⁻¹ для эвтрофных озер. Поглощение кислорода донными отложениями Кондопожской губы Онежского озера и Сортавальского залива Ладожского озера, подверженных антропогенному воздействию, соответствует уровню эвтрофного водоема.

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.

Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 689–699.

Белкина Н. А., Сандман О., Игнатъева Н. В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого

водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) // Экологическая химия. 2006. 15 (3). С. 174–185.

Васильева Е. П. Особенности формирования химического состава осадков Кондопожской губы // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1986. С. 36–47.

Васильева Е. П. Донные отложения // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 147–175.

Гамбарян М. Е. К методике определения интенсивности деструкции органических веществ в донных отложениях глубоководных водоемов // Микробиология. 1962. Т. 31, вып. 5. С. 895–898.

Драйвер Дж. Геохимия природных вод. М.: Мир, 1985. 439 с.

Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 192 с.

Игнатъева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002, С. 148–156.

Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.

Семенов А. Н. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 540 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 102 с.

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p.

Hayes F. R., Mac Aulay N. A. Lake water and sediment. Oxygen consumed in water over sediment cores // Limnol. and Oceanogr. 1959. Vol. 4, N 3. P. 291–298.

Lucas A. M., Thomas N. A. Sediment oxygen demand in lake Erie's central basin // Proceedings of 14th Conference Great Lakes Research 1970. Toronto, 1971. P. 781–787.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Белкина Наталья Александровна

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: bel110863@mail.ru
тел.: (8142) 576541

Belkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bel110863@mail.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 574.5: 556.55: 57.04 (470.22)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

**Т. М. Тимакова, А. В. Сабылина, Т. Н. Полякова,
М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т. А. Чекрыжева**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Дана оценка современного состояния экосистемы Онежского озера в последние десятилетия. Показаны изменения в биологических сообществах за длительный период времени. Выявлены основные причины, вызывающие эвтрофирующие процессы в озере, и факторы, способствующие их локализации и распространению на акватории водоема.

Ключевые слова: водная экосистема, фосфорная нагрузка, эвтрофирование, бактериопланктон, фитопланктон, первичная продукция, зоопланктон, макрозообентос.

**T. M. Timakova, A. V. Sabylina, T. N. Polyakova, M. T. Syarki, E. V. Tekanova,
T. A. Chekryzheva. MODERN STATE OF THE ONEGO LAKE ECOSYSTEM
AND TRENDS OF ITS CHANGE DURING THE PAST DECADES**

The modern state of the Onego Lake ecosystem during the last few decades was assessed. Changes in the aquatic communities over a long-term period are presented. The main reasons for the eutrophication of the lake ecosystem and the factors behind its localization and distribution over the water area are indicated.

Key words: water ecosystem, phosphorus loading, eutrophication, bacterial plankton, phytoplankton, primary production, zooplankton, macrozoobenthos.

Введение

Развитие производства и сельского хозяйства в наиболее развитых странах неизбежно приводит к увеличению антропогенной нагрузки на природные ландшафты. Водоемы, являясь аккумулялирующими системами, в наибольшей степени испытывают влияние антропогенного фактора. Онежское озеро – второй по величине крупнейший водоем Европы, относится к великим озерам мира. Его географическое положение определяет специфику термического и радиационного режимов, обуславливает низкий биопродукционный потенциал и слабую самоочистительную способность вод. Озеро обладает стратегическими запасами пресной

воды, является важнейшей водно-транспортной магистралью, используется для водоснабжения населения и промышленности. Вместе с тем водоем служит приемником промышленно-коммунальных стоков и подвержен их локальному влиянию. Его экосистема в настоящее время, как и другие крупные водоемы Европы и России в том числе, подвержена антропогенному эвтрофированию. Однако в отличие от них эта проблема для Онежского озера стоит не столь остро. В последние 15–16 лет на водосборе озера происходили изменения, связанные с экономической ситуацией в стране, что не могло не отразиться на величине антропогенной нагрузки на водоем и развитии процесса эвтрофирования его экосистемы.

Целью данного исследования явилась оценка современного состояния экосистемы Онежского озера и тенденций ее изменения за последние десятилетия.

Материал и методы

Формирование химического режима в озере в значительной степени обуславливает речной сток. Доминирующее влияние оказывают основные притоки, дренирующие сельскохозяйственные и мелиоративные угодья, – реки Водла, Шуя, Суна, которые являются основными источниками поступления в озеро фосфора – свыше 50 %. Меньшее значение в обогащении водоема биогенными веществами, чем реки (до 24 %), имеют сточные воды промышленных и коммунальных предприятий. На их долю в настоящее время приходится 173 т $P_{\text{общ}}$ и 3,3 тыс. т органического вещества в год [Сабылина, 2007]. Распределение источников загрязнения на водосборной площади неравномерно. Преобладающая их часть расположена на северо-западном побережье в районе городов Петрозаводска и Кондопоги. Ведущая роль в поступлении фосфора в составе промышленных стоков принадлежит Кондопожскому ЦБК, коммунальных – г. Петрозаводску (табл. 1).

Таблица 1. Поступление общего фосфора и органического вещества в экосистему Онежского озера от разных промцентров

Промцентр	$P_{\text{общ}}, \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$		ОВ (БПК _{полн}), тыс. т · год ⁻¹	
	1992–1996	1998–2007	1992–1996	1998–2007
Петрозаводский	122	103,6	0,65	0,5
Кондопожский	66,5	65,7	5,0	2,8

Изучение гидрохимического состава воды проводилось по аттестованным методикам [Ефременко, 2007]. Исследование водных сообществ выполнялось общепринятыми в гидробиологической практике методами: бактериопланктон, первичная продукция [Кузнецов, Дубинина, 1989]; фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос [Методика изучения..., 1975].

Результаты и обсуждение

Первые признаки развития антропогенного эвтрофирования в Онежском озере проявились в середине 1970-х гг., в период интенсивного освоения водосбора, развития промышленности и роста населения на побережье. Важным моментом, определяющим сценарий развития этого процесса, явилось совмещенное влияние двух основных источников поступления фос-

фора с речным и промышленно-коммунальным стоками в сравнительно изолированных от основного плеса озера северо-западных губах – Кондопожской и Петрозаводской. При этом неустойчивая циркуляция водных масс, обусловленная системой ветровых течений, особенно в летний период, создает условия для спорадического выноса эвтрофирующих веществ из обеих губ в пелагический район озера [Бояринов, Руднев, 1990]. Однако сложная морфометрия и система течений в озере, а также большой объем водной массы препятствуют быстрому их распространению на всей акватории водоема. Глубоководные пелагические районы озера (Центральное, Большое, Малое, Южное Онего, северные заливы – Повенецкий, Лижемский) до настоящего времени сохранили свою экологическую стабильность и проявляют черты олиготрофии. В таксономической структуре фитопланктона не произошло существенных таксономических изменений. Сезонные комплексы в фитопланктоне в течение длительного периода исследований определяют диатомовые водоросли, которые составляют подавляющую долю (>75 %) в структуре общей биомассы фитопланктона. Однако в последнее десятилетие все же отмечается некоторое снижение доли участия диатомовых водорослей и увеличение вклада других систематических отделов, в частности зеленых (от 10 до 20 %), в создании общей биомассы летнего фитопланктона. Выявляются также изменения в размерной структуре фитоценозов, что проявляется в постепенном увеличении доли мелкоклеточных видов (наопланктон) в его общей летней биомассе – в среднем 18 % [Чекрыжева, 2008б]. Однако, несмотря на отмеченные изменения, биомасса как и в прежние годы, так и в настоящее время соответствует статусу олиготрофных вод (табл. 2).

Уровень первичной продукции на преобладающей акватории пелагического района озера за 17-летний период наблюдений (с 1989 по 2006 г.) существенно не изменился. Ее величины варьируют в пределах 24–138 и в среднем составляют менее 100 мг С · м² · сут⁻¹ (88,3 ± 15,5 в Центральном Онего и 96,3 ± 10,5 мг С · м² · сут⁻¹ в южной части озера). Однако сравнение данных для Центрального Онего за более длительный срок – с 1960-х [Романенко, 1965; Сорокин, Федоров, 1969; Трифонова и др., 1982] по 2000-е гг. [Тимакова, Теканова, 1999] – выявило увеличение первичной продукции в 1,5 раза, хотя оно не является достоверным. В годовом цикле доминирующее положение занимает летний фотосинтез – до 70 % от продукции за вегетационный период. Сезонный цикл ее развития имеет одновершинный характер

и на протяжении последних 20 лет характеризуется устойчивостью и хорошей ежегодной воспроизводимостью [Сярки, Теканова, 2008]. Биотический баланс резко отрицателен. Суточная деструкция органического вещества под м² повсеместно превышает первичную продукцию в 10–12 раз, что подтверждает величины (в 13 раз), полученные Ю. И. Сорокиным и В. К. Федоровым [1969], и свидетельствует об особом значении в функционировании этого района экосистемы аллохтонного органического вещества. Максимальные величины деструкции (до 0,06 мг С · л⁻¹ · сут⁻¹) приурочены к слою эпилимниона, минимальные повсеместно фиксируются в гипolimнионе. В зависимости от толщины последнего деструкция составляет 0,3–1,7 г С · м⁻² · сут⁻¹, нередко превышая показатели для эпилимниона [Теканова, Тимакова, 2006].

Таблица 2. Сравнительная характеристика биомассы фитопланктона в разных районах Онежского озера за 50-летний период, г/М³

Район озера	Период наблюдений, годы	Сезон наблюдений		
		Весна	Лето	Осень
Петрозаводская губа	1960-е	0,640	0,130	–
	1970-е	0,960	1,057	0,200
	1980-е	1,650	1,310	0,570
	1990-е	2,347	1,028	0,850
	2000-е	1,118	1,442	0,168
Большое Онего	1960-е	0,500	0,100	–
	1970-е	0,537	0,361	0,301
	1980-е	0,835	0,654	0,443
	1990-е	0,674	0,468	0,361
	2000-е	0,678	0,494	0,392
Центральный плес	1960-е	–	0,060	–
	1970-е	–	0,250	–
	1980-е	0,608	0,798	–
	1990-е	0,351	0,602	–
	2000-е	0,694	0,687	–
Кондопожская губа	1960-е	0,270	0,165	–
	1970-е	0,068	0,100	–
	1980-е	7,770	0,680	1,100
	1990-е	12,973	0,858	0,352
	2000-е	2,724	1,315	0,307
Южное Онего	1980-е	1,211	0,582	–
	2000-е	0,805	0,691	0,332

Бактериоценозы характеризуются количественными показателями, приближающимися к верхнему пределу олиготрофии. В середине прошлого столетия общая численность бактерий (ОЧБ) не превышала 0,5–0,6 млн · мл⁻¹

Таблица 3. Распределение величин темновой ассимиляции CO₂ на акватории Онежского озера в период открытой воды в 1989–2006 гг. (по: Тимакова, 2008)

Район	Среднее для толщи воды, мкг С л ⁻¹ · сут ⁻¹		В столбе воды под м ² , мг С м ⁻² · сут ⁻¹	
	min – max	среднее ± m _М	min – max	среднее ± m _М
Центральная часть	0,11–1,62	0,53 ± 0,09	18,45–41,43	32,32 ± 3,42
Большое Онего	0,01–7,21	0,89 ± 0,25	13,90–172,60	49,12 ± 12,06
Южная часть	0,24–3,73	0,81 ± 0,13	4,48–31,18	17,26 ± 2,91
Кондопожская губа, вершина	0,60–48,00	12,64 ± 2,33	33,90–431,0	151,93 ± 38,44
Кондопожская губа, центр	0,04–10,96	2,04 ± 0,37	26,52–501,3	131,1 ± 37,78
Петрозаводская губа	0,02–25,04	1,66 ± 0,27	3,9–83,0	20,98 ± 3,85

[Александрова, 1973]. В конце 1990-х гг. ее величины все чаще стали достигать значений 0,8 млн · мл⁻¹, а в последнее десятилетие проявляют заметную вариабельность. Так, в летний период ОЧБ изменяется в пределах от 0,17 до 2,51 (в среднем 1,03 ± 0,09) млн · мл⁻¹. Небольшие размеры бактериальных клеток (V = 0,31 мкм³) определяют невысокие величины бактериальной биомассы от 4,2 до 160,4 (среднее 25,3 ± 2,1 мкг С · л⁻¹). Численность сапрофитных бактерий (СБ) достигает среднелетних значений 301 ± 53 КОЕ · мл⁻¹. Биосинтетическая активность биоценозов до конца 1990-х гг. не превышала максимальных значений 0,9, а в 2000-х, при изменчивости ее величин на акватории пелагического района от 0,01 до 7,21, в среднем составила 0,74 ± 0,21 мкг С · л⁻¹ · сут⁻¹ (табл. 3). Средневзвешенная величина бактериальной продукции (243,4 ± 53,2 мкг С · м⁻² · сут⁻¹) составляет более 100 % от первичной. Отмечаемая в последние годы высокая изменчивость количественных показателей бактериопланктона при слабом протекании фотосинтетических процессов, по-видимому, обусловлена участвовавшим поступлением в этот район загрязненных вод как из литоральных участков озера, так и из губ.

Зоопланктон Онежского озера имеет черты, характерные для всех крупных озер северо-запада России. Высокая инертность водных масс центрального и глубоководных районов озера определяет устойчивость структуры, функционирования и динамики сезонных процессов в пелагическом зоопланктоне. Его видовой состав достаточно однороден по районам, пелагический доминантный комплекс представлен 10–15 видами, обычными для озер этого региона. Количественные, структурные и функциональные показатели свидетельствуют об олиготрофном характере большей части озера. В центральном и глубоководных районах озера численность и биомасса зоопланктона достигают 20 тыс. экз. · м⁻³ и менее 1 г · м⁻³. В столбе воды среднелетняя биомасса не изменилась с 1960-х гг. и составляет 8,3 ± 1,0 г · м⁻² (менее 0,3 г · м⁻³). Остался также неизменным

состав доминирующего комплекса зооценозов [Николаев, 1972; Сярки, 2008]. Преобладающей группой в этих районах (с биомассой более 50 %) являются веслоногие рачки. Холодноводность и слабое развитие кормовой базы определяют невысокое развитие группы коловраток и ветвистоусых рачков. Видовое разнообразие зоопланктона (индекс Шеннона по биомассе до 3,5) свидетельствует о неизменном характере структуры сообщества.

Население макрозообентоса также отличается сравнительно невысокими количественными показателями (в среднем 2 тыс. экз. · м⁻² и 3 г · м⁻²) и постоянным видовым составом. Сообщества представлены реликтовыми ракообразными, олигохетами, в небольшом количестве двустворчатými моллюсками и холодноводными видами хирономид. Внесенный в Красную книгу Карелии реликтовый бокоплав *Relictocanthus lacustris* G. Sars. относится к исчезающим видам и встречается крайне редко. Более 90 % биомассы животных приходится на амфипод и олигохет. Однако с конца 1980-х гг. в поверхностном слое донных отложений было отмечено увеличение концентрации органического вещества (ОВ), содержания общего фосфора в 3 раза, легкоподвижного – более чем на порядок [Белкина, 2007]. Это повлекло за собой устойчивый рост количественных показателей макрозообентоса, которые в центральном плесе достигли пределов 1,0–3,5 (среднее 1,45 ± 0,19) тыс. экз. · м⁻² и 1,9–10,0 (3,1 ± 0,4) г · м⁻², что превышает аналогичные характеристики 1970-х гг. в 3 раза (табл. 4). Здесь стали заметными также структурные преобразования в донных группировках. Прежде всего они проявляются в увеличении соотношения численности олигохет (N_о) и суммарной численности бентоса (N_б), что хорошо отражает накопление ОВ и биогенных веществ на дне водоема. К числу отрицательных изменений относится уменьшение в центральном плесе количества реликтовых амфипод.

Наиболее эвтрофируемыми районами Онежского озера являются Кондопожская и Петрозаводская губы. Резкое увеличение фос-

форной нагрузки (P_{общ}) на Петрозаводскую губу началось в 1980-е гг. До середины 1990-х гг. ее величины от Петрозаводского промузла достигали 2,7, а с речным стоком – 1,2 г · м⁻² · год⁻¹. С конца 1990-х ситуация изменилась. Нагрузка P_{общ} с речным стоком (1,6 г · м⁻² · год⁻¹) стала преобладать над таковой от промузла – 1,4 г · м⁻² · год⁻¹ [Сабылина, 2007]. В настоящее время в Петрозаводскую губу из всех источников поступает 223,8 т · год⁻¹ P_{общ}, а среднегодовая концентрация в воде залива достигает 20 мкг · л⁻¹ против 17 в 1990-е и 25 мкг · л⁻¹ в 1980-е гг.

Основным загрязнителем Кондопожской губы до конца 1970-х гг. было органическое вещество, в составе которого преобладали биохимически нестойкие фракции – спирты, альдегиды, сахара, органические кислоты, фурфурол. Они быстро утилизируются бактериофлорой, являются потенциальным источником минеральных форм фосфора и служат основой для развития гетеротрофных процессов. До 1980-х гг. антропогенное эвтрофирование тяготело здесь к гетеротрофному пути развития. В начале 1980-х, после пуска первой очереди станции биологической очистки сточных вод на Кондопожском ЦБК, вынос фосфора в губу со сточными водами быстро возрос в 3–6 раз по сравнению с 1960–1970-ми гг. Его содержание в воде на акватории изменялось в пределах 17–40 мкг · л⁻¹, что привело к активизации первично продукционных процессов и резкому увеличению биомассы фитопланктона.

Количественные показатели летнего фитопланктона (см. табл. 2) выросли на порядок по численности (235,0 тыс. кл. · л⁻¹) и в 20 раз (0,45 г · м⁻³) по биомассе. Происходило заметное расширение круга массовых форм синезеленых (р. *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*) и зеленых (р. *Ankistrodesmus*, *Crucigenia*, *Coelastrum*, *Dictyosphaerium*, *Eudorina*, *Planctococcus*) на фоне интенсивной вегетации доминанта олиготрофного периода *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim. К концу 1980-х гг. развитие водорослей возросло еще больше по сравнению с началом 1980-х (в 5 и в 2 раза) по численности и биомассе (соответственно в 5 и

Таблица 4. Многолетние изменения количественных характеристик макрозообентоса в различных районах озера

Район озера	1970-е		1980-е		1990-е		2000-е	
	N	B	N	B	N	B	N	B
Центральный плес	0,48	1,28	0,94	1,52	1,73	3,36	1,50	3,10
Большое Онего	0,43	1,02	0,85	2,70	1,54	2,88	1,00	2,67
Повенецкий залив	1,16	1,68	2,30	2,78	–	–	2,80	3,0
Южная часть	0,756	1,53	1,05	1,91	3,03	5,13	2,20	3,23
Петрозаводская губа	0,96	2,06	3,00	6,04	8,11	13,27	7,31	8,26
Кондопожская губа	0,27	0,72	1,30	1,88	4,10	6,54	8,35	12,63

Примечание. N – численность, тыс. экз. · м⁻²; B – биомасса, г · м⁻².

в 2 раза) за счет массовых эвтрофных видов. В последние десятилетия общее повышение уровня трофии Кондопожской губы во многом обусловлено влиянием богатых органическими веществами сточных вод ЦБК. Фитопланктонный комплекс пополняется не только видами, характерными для вод более высокого уровня трофии, но и видами, являющимися индикаторами органического загрязнения. В настоящее время в планктоне губы 70 % видов относятся к индикаторам β -, β - α -, α -сапробных условий, в том числе из криптофитовых р.р. *Chroomonas* и *Cryptomonas* [Чекрыжева, 2008a]. До конца 1990-х гг. только один вид был отнесен к показателям α -сапробных условий и 12 видов – β -сапробных условий, в целом не более 20 %.

Фитоценозы Петрозаводской губы в период значительного роста фосфорной нагрузки на экосистему (1980-е гг.) также отреагировали увеличением продуктивности. Их численность возросла в среднем до 2,0 млн кл. · л⁻¹, а биомасса – до 7,0 г · м⁻³. В последующие десятилетия и до настоящего времени количественные показатели фитоценозов остались приблизительно на таком же уровне, что и в конце 1980-х – начале 1990-х гг. (см. табл. 2).

В трансформации фитоценозов в обеих губах можно выделить схожие моменты: значительное увеличение количественных характеристик в весенний период, обусловленное мощной вегетацией *A. islandica*; ускоренное развитие синезеленых и хлорококковых водорослей на фоне диатомовых при относительной устойчивости структуры фитоценоза; рост всех массовых видов олиготрофного периода; усиление роли летнего и осеннего фитопланктона в годовом цикле; заметное присутствие в фитоценозах водорослей – показателей сапробности.

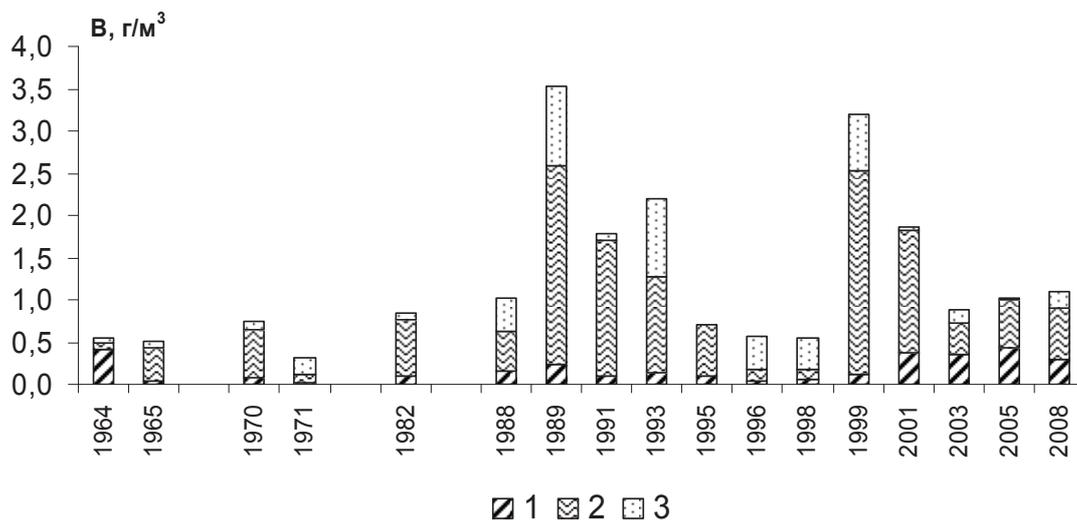
Одновременно с интенсивным развитием фитопланктона в эвтрофируемых губах возрастала интенсивность фотосинтеза, которая превысила показатели олиготрофных пелагических районов в 3–10 раз, интегральная продукция – в 1,5–3,0 раза. Максимальные значения первичной продукции в Кондопожской губе достигли величин 1037 мг С · м⁻² · сут⁻¹, в Петрозаводской, за счет выноса фосфора в открытые участки озера, она в 1,5 раза ниже, чем в Кондопожской. В сопредельном с Петрозаводской губой районе (Петрозаводское Онего) ее показатели бывают даже выше, чем в самой губе. Интенсивность деструкции органического вещества в губах превосходит ее величины в пелагических глубоководных районах озера в 1,5–2,0 раза.

Наиболее подвижной структурой биоты в губах является бактериопланктон. До 1980 г. бактериальному звену принадлежала особая

роль в развитии эвтрофирования Кондопожской губы, особенно в ее северной части, так как аллохтонное органическое вещество, включающееся в биотический круговорот, значительно превалировало над автохтонным. Численность бактерий здесь в среднем достигала 3,5 млн · мл⁻¹, количество СБ – до 10 тыс. КОЕ · мл⁻¹. После пуска на комбинате СБО в 1980-е гг. все большее значение в развитии эвтрофирования стал приобретать автотрофный путь. Бактериопланктон в этот период в количественном развитии достиг некоторой стабилизации. Общая численность бактерий в среднем для губы составила 1,3 млн · мл⁻¹, СБ – 0,6 тыс. КОЕ · мл⁻¹. Уменьшение антропогенной нагрузки на 30 % в середине 1990-х гг. привело к снижению развития бактерий в 1,5–2 раза, особенно в районе, где жизнедеятельность бактерий базируется преимущественно на ОВ, поступающем со сточными водами. Однако с конца 1990-х гг. вновь происходит рост объема сбрасываемых сточных вод и подъем количественных показателей бактериоценозов. В последние годы они характеризуются большой изменчивостью. В разных районах губы ОЧБ изменяется в пределах от 1,6 до 3,3 млн кл. · мл⁻¹, а интенсивность темновой фиксации CO₂ – от 9,7 до 15,0 мкг С · л⁻¹ · сут⁻¹.

В Петрозаводской губе благодаря интенсивному водообмену ОЧБ в течение последних 15 лет достигает уровня 0,9–1,8 млн · мл⁻¹. Биосинтетическая активность бактериальных сообществ (по темновой ассимиляции CO₂) на акватории обеих губ варьирует в широких пределах, однако средние величины характерны для мезо-эвтрофных водоемов (см. табл. 3).

В зоопланктонных сообществах наиболее наглядные изменения в обеих губах прослеживаются в районах с сильно выраженными признаками эвтрофирования [Куликова, Сярки, 2004]. В Кондопожской губе в начальный период развития этого процесса (1980-е гг.) летние численность и биомасса зооценозов в северной части губы составляли 90 тыс. экз. · м⁻³ и 2,4 г · м⁻³, тогда как в 1960-е гг. – 20 и 0,5 соответственно. Разнообразие организмов (индекс Шеннона по численности 2,11–2,46 и по биомассе 2,53–2,68) за 20-летний период существенно не изменилось, поскольку прирост общей численности произошел не за счет видов-доминантов, а за счет средне- и малочисленных видов [Куликова и др., 1997]. Наиболее выраженные изменения в зоопланктоне проявились лишь в конце 1980-х гг. – в период интенсивного развития процесса антропогенного эвтрофирования (рис.). Рост численности поч-



Многолетние изменения биомассы зоопланктона в северной части Кондопожской губы:
1 – Copepoda; 2 – Cladocera; 3 – Rotatoria

ти всех видов определил высокие общие количественные параметры (до 100 тыс. экз. · м⁻³ и 3,5 г · м⁻³). Преобладание 1–2 видов (в основном фильтраторов, в частности *Daphnia cristata*) привело к уменьшению разнообразия сообщества – индекс Шеннона по численности составлял 1,57–1,73, а по биомассе – 1,94–2,40. Вследствие этого было сдвинуто соотношение основных таксономических групп. Среди трофических групп увеличилась доля фильтраторов за счет уменьшения хищных видов. При снижении нагрузки в 1990-х гг. количество зоопланктона заметно понизилось. В настоящее время планктонная система испытывает неустойчивые колебания количественных показателей. Следует заключить, что в наиболее эвтрофированных участках озера (северная часть Кондопожской губы) перестройка трофической структуры зоопланктона отражается на основных энергетических показателях: увеличивается как общая продукция сообщества, так и затраты на поддержание его жизнедеятельности.

В Петрозаводской губе зоопланктон с 1970-х гг. не претерпел значительных изменений, и его количественные характеристики в столбе воды сопоставимы с таковыми из центральной части озера (среднегодовая биомасса 9,0 г · м⁻², или около 1 г · м⁻³). Высокая динамичность вод обеспечивает перемешивание и выравнивание показателей зоопланктона по акватории губы. Лишь в районе сброса стоков КОС общая численность зоопланктонов может увеличиваться до 40–50 тыс. экз. · м⁻³. В то же время структура сообщества в губе изменяется в сторону увеличения роли коловраток и мелких циклопов, что приближает ее к β-мезотрофному состоянию.

Наиболее сильно эвтрофирование проявляется на состоянии донных ценозов, которые претерпевают устойчивые изменения. Они выделяются стабильно высоким количественным развитием, обилие которого в несколько раз, а в отдельных случаях и на порядок выше, чем в других районах озера (см. табл. 4). Так, в Кондопожской губе средние величины численности и биомассы в последнее десятилетие составляют 8,35 ± 0,94 тыс. экз. · м⁻² и 12,63 ± 1,26 г · м⁻², при размахе их колебаний – 0,04–15,0 тыс. экз. · м⁻² и 0,02–53,0 г · м⁻². Рост количественных характеристик сопровождается структурными преобразованиями – снижением видового разнообразия за счет исчезновения наиболее чувствительных к ухудшению экологических условий типичных представителей фауны олиготрофных водоемов и замены их на толерантные эврибионтные формы, уменьшением индивидуальной массы особей, что, в свою очередь, обуславливает изменения уровня функционирования сообществ. Снижение показателей выровненности и увеличение индексов полидоминантности на протяжении всего периода наблюдений указывают на возрастание степени доминирования отдельных элементов системы и в конечном счете – упрощение ее структурной организации.

По уровню количественного развития сообществ донных животных (7,31 ± 0,86 тыс. экз. · м⁻² и 8,26 ± 0,60 г · м⁻²) эвтрофирование в Петрозаводской губе к настоящему времени достигает β-мезо-, а в Кондопожской – α-эвтрофного уровня [Китаев, 2007].

Не менее актуальной проблемой последнего десятилетия для Онежского озера является

биологическое загрязнение. В литоральных биоценозах происходят серьезные экосистемные преобразования в связи с инвазией чужеродного вида *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing). В настоящее время он распространился практически по всему водоему и является массовым видом в прибрежном мелководье. Прочно войдя в состав донных сообществ, байкальский бокоплав существенно изменил их структурные характеристики. Он стал доминирующим видом на всех типах озерной литорали (32–71 % средней численности и 37–73 % средней биомассы) и увеличил количество бентоса в прибрежье озера в среднем на 50 % [Кухарев и др., 2008]. Этот вид кардинальным образом трансформировал потоки вещества и энергии в литорали, потребляя, с одной стороны, различные виды трофических ресурсов и, с другой стороны, выступая в качестве жертв для рыб, которые охотно используют его в пищу.

Выводы

1. Антропогенное эвтрофирование наглядно проявляется в северо-западных губах, Кондопожской и Петрозаводской, составляющих 4–5 % от всей площади озера. До 1980-х гг. в его развитии большую роль играли гетеротрофные процессы. В последующие десятилетия, после введения биологических очистных сооружений на побережье обеих губ, все большее значение приобретает автотрофный путь развития этого процесса.

2. Основная акватория водоема сохраняет свое первоначально олиготрофное состояние и характеризуется низким биопродукционным потенциалом. Однако водообмен между губами и открытой частью озера, а также высокая ассимиляционная способность донных отложений приводят к неуклонному росту концентраций как фосфора, так и органического вещества в иловых отложениях сопредельных с губами глубоководных пелагических районов озера. Это сопровождается устойчивым ростом количественных показателей макрозообентоса, а в последние годы – заметными структурными преобразованиями в донных группировках. В планктонных сообществах (бактерио-, фито-, зоопланктоне) отмечаются лишь спорадические изменения, которые не имеют постоянного характера.

3. В последнее десятилетие в Онежском озере появился новый тип антропогенного воздействия – биологическое загрязнение. Литоральные биотопы озера претерпели значительные преобразования под влиянием инвазионного вида *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing), который распространился практически по всему озеру и

является массовым видом в прибрежном мелководье.

Литература

Александрова Д. Н. Бактериопланктон и микрофлора донных отложений Онежского озера // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л.: Наука, 1973. С. 5–83.

Белкина Н. А. Онежское озеро и его притоки. Химический состав донных отложений // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 40–49.

Бояринов П. М., Руднев С. Ф. Инструментальные исследования течений // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 53–71.

Ефременко Н. А. Методы отбора и химического анализа проб воды // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 10–12.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 394 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных организмов. М.: Наука, 1989. 286 с.

Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон Онежского озера. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1997. 110 с.

Куликова Т. П., Сярки М. Т. Влияние антропогенного эвтрофирования на распределение зоопланктона в Кондопожской губе Онежского озера // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 1. С. 91–97.

Кухарев В. И., Полякова Т. Н., Рябинкин А. В. Распространение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежском озере // Зоол. журн. 2008. Т. 87, № 10. С. 1270–1273.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

Николаев И. И. Сравнительно-лимнологическая характеристика зоопланктона Онежского озера // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 283–304.

Романенко В. И. Микробиологическое обследование Онежского озера, Выгозерского водохранилища и озер Беломорско-Балтийского канала // Микробиология. 1965. Т. 34, вып. 2. С. 350–356.

Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Внешняя нагрузка на Онежское озеро // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 19–21.

Сорокин Ю. И., Федоров К. В. Первичная продукция и деструкция в Онежском озере // Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск, 1969. Вып. 3. С. 29–33.

Сярки М. Т. Оценка рыбопродуктивности по состоянию кормовой базы. Зоопланктон // Биологические ресурсы Онежского озера. Петрозаводск, 2008. С. 54–67.

Сярки М. Т., Теканова Е. В. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Известия РАН. Сер. Биол. 2008. № 5. С. 621–625.

Теканова Е. В., Тимакова Т. М. Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной

гидробиологии. М.: Содружество научных изданий КМК, 2006. С. 60–71.

Тимакова Т. М. Бактериопланктон, как пищевой ресурс для развития кормовой базы рыб в Онежском озере // Биологические ресурсы Онежского озера. Петрозаводск, 2008. С. 43–54.

Тимакова Т. М., Теканова Е. В. Характеристика процессов первичного продуцирования органического вещества // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1999. С. 174–191.

Трифонов И. С., Ульянова Д. С., Чеботарев Г. Н. Первичная продукция, содержание хлорофилла и ор-

ганическое вещество сестона в Онежском озере летом 1977 года // Гидробиол. журн. 1982. Т. 18, № 5. С. 106–109.

Чекрыжева Т. А. Изменения в структуре летнего фитопланктона Кондопожской губы Онежского озера в процессе антропогенного эвтрофирования // Тр. Карельского НЦ РАН. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2008а. С. 156–163.

Чекрыжева Т. А. Фитопланктон как компонент биоресурсной базы озера // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск, 2008б. С. 24–36.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Тимакова Тамара Михайловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ttm49@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Сабылина Альбина Васильевна

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Полякова Тамара Николаевна

главный гидробиолог
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: TNPVVL@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Сярки Мария Тагиевна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: msyarki@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Теканова Елена Валентиновна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: etekanova@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Чекрыжева Татьяна Александровна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Tchekryzheva@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Timakova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ttm49@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Sabylina, Al'bina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Polyakova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: TNPVVL@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Syarki, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: msyarki@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Tekanova, Elena

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: etekanova@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Chekryzheva, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Tchekryzheva@mail.ru
tel.: (8142) 576520

УДК 556.55 (282.247.151)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

**Е. В. Теканова, П. А. Лозовик, Н. М. Калинкина,
Т. П. Куликова, Т. Н. Полякова, А. В. Рябинкин,
Ю. Л. Сластина, Т. М. Тимакова, Т. А. Чекрыжева**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Показаны многолетние изменения, произошедшие в северной части Выгозерского водохранилища. Оценены качество водной среды, количественные, структурные и продукционные характеристики биоценозов в связи с изменением нагрузки сточными водами Сегежского промцентра. Выделены три основных этапа трансформации экосистемы: 1960–70-е годы – угнетение биоты вследствие токсического и органического загрязнения; 1980-е – антропогенное эвтрофирование, рост количественных характеристик и изменение структуры ценозов, 1990–2000-е – сокращение фосфорной нагрузки и снижение количественного развития биоты.

Ключевые слова: водная экосистема, сточные воды, эвтрофирование, токсичность, фосфорная нагрузка, качество воды, биота.

**E. V. Tekanova, P. A. Lozovik, N. M. Kalinkina, T. P. Kulikova,
T. N. Polyakova, A. V. Ryabinkin, Yu. L. Slastina, T. M. Timakova,
T. A. Chekryzheva. RECENT STATE AND TRANSFORMATION OF THE
NORTHERN PART OF VYGOZERSKOE RESERVOIR**

Long-term changes in state of the northern part of Vygozerskoe storage reservoir are presented. The water quality, abundance, structure and production characteristics of the biocenoses are estimated in accordance with the changes of the industrial center mill sewage loading. The three main periods in the ecosystem transformation are determined: 1960–70s – inhibition of the biota due to toxic and organic pollution, 1980s – anthropogenic eutrophication, increase in quantitative indexes and structural changes of cenoses, 1990–2000s – decline of the biota abundance due to lowering of the phosphorus loading.

Key words: water ecosystem, eutrophication, sewage, toxicity, phosphorus loading, water quality, biota.

Введение

Интенсивная эксплуатация водных ресурсов мира во второй половине XX в. привела к существенным, подчас необратимым изменениям естественного состояния пресноводных экосистем (токсификация, термофикация, органическое загрязнение, эвтрофирование, закисление и др.). В настоящее время во многих

водоемах мира отмечается улучшение экологической ситуации или процессы восстановления, связанные с ужесточением контроля и совершенствования систем очистки сточных вод (Европа, США) или с экономическим кризисом (страны СНГ). Процесс этот недостаточно изучен, в частности, остается неясным, происходит ли возврат экосистем в исходное состояние на всех уровнях ее организации [Jeppesen et al.,

2002; Решетников, 2004; Михеева и др., 2006; Остапеня, 2007 и др.].

Выгозерское водохранилище (63°30' с. ш., 34°40' в. д., площадь 1140 км², средняя глубина 6,2 м, максимальная – 20 м) играет весьма важную роль в экономике региона (транспортная артерия, система водоснабжения, энергетика) и в течение более 70 лет испытывает значительную антропогенную нагрузку. Доминантом по степени антропогенного влияния на экосистему является Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат (СЦБК), сточные воды которого оказывают значительное влияние на химический состав воды, в первую очередь, северной части водохранилища. Состав и количество сточных вод менялись с момента ввода в строй комбината, что последовательно отражалось на состоянии водной среды и биологических сообществ, претерпевших существенную трансформацию.

Целью настоящей работы было выявление основных закономерностей изменений водных сообществ и среды их обитания в северной части Выгозерского водохранилища за многолетний период.

Материал и методы

В работу вошли основные результаты многолетних исследований химического состава воды, антропогенной нагрузки и состояния водных сообществ (бактерио-, фито-, зоопланктона и макрозообентоса) Выгозерского водохранилища. Исследования выполнялись сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН в рамках фундаментальных работ, а также по региональной Программе мониторинга водной среды Карелии и были направлены, главным образом, на изучение северной части водоема, находящейся под влиянием сточных вод СЦБК. Химический анализ воды выполнялся по аттестованным методикам [Ефременко, 2007]. Изучение состояния водных сообществ проводилось общепринятыми в гидробиологической практике методами [Методика изучения..., 1975; Кузнецов, Дубинина, 1989].

Результаты и обсуждение

Нагрузка и химия воды. Формирование химического состава воды Выгозерского водохранилища происходит в результате поступления в него речных вод, атмосферных осадков, а также сточных вод Сегежского промцентра и внутриводоемных процессов. Основное влияние сточных вод сказывается на северной части водохранилища, куда они непосредственно поступают. В связи с мощным стоковым течением в водохранилище, направленным с юга на

север, и наличием большого количества островов, ограничивающих северную часть от центральной, влияние сточных вод на последнюю прослеживается в меньшей степени и практически не затрагивает южную часть.

За многолетний период существования комбината выделяются несколько периодов, отличающихся по уровню антропогенной нагрузки и по реакции экосистемы на нее. Анализируя многолетнюю динамику антропогенной нагрузки на Северное Выгозеро по различным веществам, можно выделить периоды с максимальной и минимальной нагрузкой по сравнению с природной (табл. 1).

Таблица 1. Антропогенная и природная нагрузки на Северное Выгозеро

Показатель	Антропогенная		Природная
	максимальная	минимальная	
Взвеш. вещества, г/м ² в год	110 (1964–1965 гг.)	12 (1995–2010 гг.)	18
ОВ, г/м ² в год	143 (1969–1975 гг.)	15 (1995–2010 гг.)	360
Лабильные ОВ, г О ₂ /м ² в год	86 (1969–1975 гг.)	7 (1992–2010 гг.)	11
P _{общ.} , г/м ² в год	0,47 (1976–1981 гг.)	0,03 (1995–2010 гг.)	0,31
Фенолы, г/м ² в год	0,47 (1969–1975 гг.)	0,03 (1995–2010 гг.)	0,09

Наибольшая нагрузка взвешенными веществами наблюдалась в 1960-е гг. В дальнейшем в связи с внедрением очистки сточных вод от взвешенных веществ нагрузка уменьшилась. В настоящее время она составляет 70 % от природной, следствием чего является повышенное осадконакопление в Северном Выгозере по сравнению с природным состоянием. По общему содержанию органических веществ (ОВ) выделяется период 1969–1975 гг., когда нагрузка достигала 360 г/м² в год. Минимальной она была до начала 1960-х гг. (в среднем 64 г/м² в год), когда комбинат еще не имел высоких показателей производства, и в последнее десятилетие (в среднем 15 г/м² в год) в связи с сокращением производства. Аналогичная ситуация наблюдается и по лабильным ОВ. Меньше всего их поступает в водоем в последние годы. Что касается P_{общ.}, основного лимитирующего биогенного элемента, то его наибольший вынос со сточными водами наблюдался в 1976–1981 гг., когда происходил запуск станции биологической очистки (СБО) и вывод ее на проектные показатели. Период 1980-х и начала 1990-х гг. характеризуется наибольшей фосфорной нагрузкой на водоем. В дальнейшем она уменьшалась по мере сокращения производства и в последние годы составляет всего 0,03 г/м² в год (10 % от природной). Наибольшее токсичное загрязне-

ние отмечалось в период отсутствия очистки сточных вод. Так, нагрузка фенольными соединениями перед вводом СБО достигала 0,47 г/м² в год, а в 1990-е гг. она снизилась в 15 раз. Как следствие изменения нагрузки на водоем, отмечалось разное загрязнение водных масс Северного Выгозера в соответствующие периоды наблюдений (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика загрязнения Северного Выгозера в разные периоды (А – придонные слои воды в зимний период, Б – водные массы в период открытой воды)

Показатель		1964–1965 гг.	1969–1975 гг.	1976–1981 гг.	1982–1991 гг.	1995–2010 гг.
Σ _и , мг/л	А	71	136	156	190	138
	Б	27	27	32	22	24
ПО, мг О ₂ /л	А	39	96	81	57	21
	Б	13	13	14	13	13
БПК ₅ , мг О ₂ /л	А	12	24	19	13	2,6
	Б	1,0	1,6	1,5	1,2	0,7
О ₂ , %	А	0–40	0	0–2	0–10	2–37
	Б	56–86	20–83	30–86	48–82	79–95
Р _{общ} , мкг/л	А	Нет данных	Нет данных	240	424	348
	Б	20	24	50	34	16
Фенолы, мкг/л	А	Нет данных	50	60	Нет данных	15
	Б	Нет данных	15	10	5	5

Наибольшее загрязнение токсичными веществами (сероорганическими веществами, фенолами, смоляными кислотами и др.) наблюдалось в период максимальной мощности работы комбината (1969–1975 гг.), минимальное – в последние годы в связи с очисткой сточных вод и сокращением производства целлюлозы. Максимальное содержание Р_{общ} (50 мкг/л) отмечалось в 1976–1981 гг. – начальный период работы СБО и вывод ее на проектные показатели. В последние годы уровень концентрации Р_{общ} близок к природному. В кислородном режиме водоема также произошли существенные изменения. От типично дефицитного по кислороду водного объекта водоем перешел к близко равновесному насыщению воды кислородом. Следует отметить, что, несмотря на существенное снижение загрязненности вод в период открытой воды, в зимний период по-прежнему сохраняется загрязнение вод в придонных слоях воды, что связано с характером выпуска сточных вод Сегежского промцентра, которые в зимний период распространяются по понижениям дна котловины.

Изменения водных сообществ. До ввода в строй СБО водные сообщества функционировали в условиях токсического и органического загрязнения [Харкевич, 1969]. Наблюдалось угнетающее действие высокотоксичных вод СЦБК

на биоту. В экспериментах с неразбавленными стоками рачки *Daphnia magna* Straus и *Daphnia longispina* (O. F. Müller 1785) погибали через сутки [Куликова, 1983]. Наличие органического загрязнения воды обуславливало преобладание в бактериоценозах сапрофитной флоры, поглощающей большое количество кислорода, что привело к формированию анаэробных зон в районе сброса сточных вод (Лайкоручей). В донных отложениях этого участка обнаруживались лишь сульфатредуцирующие, тионовые, денитрифицирующие и целлюлозоразрушающие бактерии, выдерживающие дефицит или отсутствие кислорода. Невысокое количественное развитие преимущественно диатомового планктона (более 90 % численности) определяло низкий уровень хлорофилла *a* и первичной продукции [Вислянская, 1978; Вислянская, Харкевич, 1985]. Показатели количественного развития планктонных и бентосных животных также были невысоки, район выпуска сточных вод был «мертвой зоной». В целом в распределении на акватории планктонных и бентосных животных четко проявлялась зональность, связанная со степенью загрязненности среды [Филимонова, 1969; Соколова, 1978]. В наиболее загрязненных участках происходило изменение структуры зоопланктона: исчезали менее устойчивые виды, в первую очередь, каланоиды (*Eudiaptomus*, *Eurytemora*, *Heteroscope*), преобладали мелкие циклопы, ветвистоусые рачки (*Daphnia cristata*, *Bosmina longirostris*) и колероватки (*Kellicottia*, *Polyarthra*) [Куликова, 1978]. В донных комплексах преобладали хирономиды, среди которых абсолютными доминантами были личинки рода *Procladius* [Соколова, 1978]. В целом до середины 1970-х гг. трофический статус экосистемы Выгозера, по классификации С. П. Китаева [1984], характеризовался как олиго-мезотрофный по большинству показателей (табл. 3).

Функционирование с 1976 г. СБО привело к снижению содержания в сточных водах ядовитых серосодержащих веществ [Лозовик, 1985] и уменьшению их токсического действия на биоту. Неразбавленные стоки не являлись токсичными для моллюсков (*Spaerium corneum* Linnaeus, *Planorbis* sp.), олигохет (*Tubifex tubifex* Muller), икры и личинок щуки. Однако для рачков *Daphnia magna* и икры радужной форели токсичность сохранялась (1–3 балла, или гибель тест-объектов в экспериментах в течение 5–20 сут) [Ивантер и др., 2007].

В то же время произошло увеличение выноса в водоем фосфора со сточными водами, используемого на СБО в качестве биогенной добавки, что послужило началом антропогенного эвтро-

Таблица 3. Состояние водных сообществ Северного Выгозера в разные периоды

	Показатель	1960–1970-е гг.	1980-е гг.	1990–2000-е гг.
Бактериопланктон	Общ. численность, млн кл./мл	1,2	15	0,8
	Сапрофитные бактерии, тыс. кл./мл	0,6	32	0,6
Фитопланктон	Численность, тыс. кл./л	215	895	426
	Биомасса, г/м ³	0,4	1,8	0,7
Хлорофилл <i>a</i>	В фотическом слое, мг/м ³	1,1	11,4	3,0
Первичная продукция	В фотическом слое, мг С/м ² ·сут	204,2	673,0	162,7
Зоопланктон	Численность, тыс. экз./м ³	16,9	72,5	38,5
	Биомасса, г/м ³	0,5	1,2	0,7
Макрзообентос	Численность, тыс. экз./м ²	0,1	3,0	1,0
	Биомасса, г/м ²	0,5	3,0	1,1

фирования водоема. Количественные и функциональные показатели развития фитопланктона выросли в 2–4 раза [Вислянская, Харкевич, 1985]. Видовое разнообразие фитоценозов расширилось за счет возрастания роли видов-показателей повышения уровня трофии и органического загрязнения из синезеленых (виды из родов *Oscillatoria*), хлорококковых (виды из родов *Monoraphidium*), из вольвоксовых (виды из родов *Chlamydomonas*), из эвгленовых (виды из родов *Euglena*, *Phacus*), из желтозеленых (виды из родов *Tribonema*), из криптофитовых (виды из родов *Cryptomonas*) [Изменение режима..., 1989; Вислянская, 1998]. Почти на порядок возросла численность бактерий, особенно гетеротрофных, вследствие биогенной стимуляции микроорганизмов и выноса аллохтонной микрофлоры с СБО [Изменение режима..., 1989]. Улучшение кормовой базы привело к 5–6-кратному росту обилия организмов зоопланктона и позже, по мере накопления ОБ в илах, – макрозообентоса. Произошла качественная перестройка сообществ – смена доминантных видов и увеличение видового разнообразия. Среди планктонных животных увеличилась доля видов мелких циклопов *Mesocyclops leuckarti* (Claus 1857) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863) (в 3–5 раз), кладоцер *Daphnia cristata* Sars 1862, босмин (в 2–4 раза) и коловраток, особенно мелких видов *Polyarthra*, *Keratella*, *Synchaeta* (в 7–12 раз). В зимний период наблюдались «планктонные фронты» – скопления зоопланктона на границе грязных и чистых вод [Куликова, 1998]. В донных ценозах возросла степень доминирования грунтоедов (малощетинковых червей) [Полякова, 1998]. Произошло исчезновение из бентофауны реликтовых ракообразных *Monoporeia affinis* (Lindström 1855) и *Pallasiola quadrispinosa* (Sars 1867). В зоне нового выпуска сточных вод (Мозог-губа) бентоценозы оставались в угнетенном состоянии. Экосистема северной части Выгозера в 1980-х гг., по классификации С. П. Китаева [1984], оценивалась как мезо-эвтрофная (табл. 3).

В результате спада производства на СЦБК в начале 1990-х гг. существенно сократились объемы сточных вод и вынос в их составе фосфора в водоем. Уже к середине 1990-х гг. содержание фосфора в воде Северного Выгозера, за исключением действующего и старого мест выпуска сточных вод, сократилось примерно в 2 раза [Лозовик, 1998], чему способствовала достаточно высокая проточность водохранилища (коэффициент условного водообмена 1,14 год⁻¹). В результате постепенной модернизации СЦБК и очистных сооружений в 2000-х гг. из сточных вод полностью исчезли токсичные вещества. Это подтверждалось в экспериментах на тест-объекте *Daphnia magna* в хронических опытах, более того, вода характеризовалась благоприятными для его жизни условиями [Моисеева, 2005].

В планктонных сообществах уже с середины 1990-х гг. регистрировалось постепенное уменьшение показателей их количественного развития – сначала в фитопланктоне и бактериопланктоне, затем, вследствие обеднения кормовой базы, и в зоопланктоне [Состояние водных объектов..., 2007]. Показатели обилия донных животных, функционирование которых отражает эффект накопления органического загрязнения, снижались намного медленнее – значимые изменения здесь произошли лишь к 2007 г. (табл. 3).

В настоящее время сохраняются структурные изменения в альгоценозах, начавшиеся в период эвтрофирования, а именно: достижение доли синезеленых и хлорококковых водорослей в сообществе до 30 % численности, вследствие чего содержание хлорофилла *a* в воде в настоящее время более высокое, чем в 1970-е гг. В то же время продукция фитопланктона понизилась до уровня начала 1970-х гг. В зоопланктонном сообществе отмечается снижение роли массовых видов – кладоцер (*Daphnia*), мелких циклопов (*Thermocyclops*, *Mesocyclops*), коловраток (особенно *Polyarthra*, *Keratella*, *Synchaeta*), в целом же доминирующая роль кладоцер и

коловраток сохраняется. Структура бентоценозов постепенно приобретает черты, свойственные естественному состоянию водоемов подобного типа: сокращается степень доминирования малощетинковых червей, лидирующее положение возвращается к хирономидам. Отмечается начало восстановления фауны в «мертвой зоне» (Лайкоручей). В целом по гидробиологическим показателям экосистема Северного Выгозера на современном этапе характеризуется как олигомезотрофная [Китаев, 1984].

В целом на акватории всего водохранилища исследованиями 1970-х гг. было показано неравномерное распределение количественных показателей развития планктонных и донных сообществ, а именно: закономерное увеличение их численности и биомассы по направлению от северного района к южному [Вислянская, 1978; Куликова, 1978; Соколова, 1978]. Такое распределение обуславливалось комплексом факторов (морфометрические особенности районов, температура, проточность, наличие пищевых ресурсов, качественный состав воды и т. д.), но, в первую очередь, было связано с угнетающим действием на биоту токсичных сточных вод Сегежского ЦБК в северной части водохранилища. Иная картина наблюдалась в распределении бактериопланктона: наименьшим его количеством характеризовалась центральная часть водоема, наибольшим – северная вследствие высокой антропогенной нагрузки ОВ [Филимонова, 1978]. Первичное продуцирование ОВ на всей акватории характеризовалось схожими величинами. Исследованиями последних лет не обнаружено значительных изменений в уровне развития биоты в центральном районе водохранилища, в то же время в его южной части количество и биомасса планктонных организмов, а также первичная продукция примерно в 2 раза превышают данные 1970-х гг. В центральном и северном районах показатели развития планктона в настоящее время, после сокращения антропогенной нагрузки, можно считать сравнимыми. Максимальными показателями, как и 40 лет назад, характеризуется южная часть водоема. Бентофауной наиболее обильно заселен северный район Выгозерского водохранилища, где произошло накопление ОВ в донных отложениях.

Выводы

В экосистеме Выгозерского водохранилища, главным образом в его северной части, произошли существенные изменения в результате многолетней динамики нагрузки сточных

вод Сегежского ЦБК. Основные изменения в экосистеме были связаны: 1) с токсификацией и органическим загрязнением водной среды в 1960–1970-е гг., сопровождающимся угнетением жизнедеятельности бионтов, развитием специфической микрофлоры; 2) с антропогенным эвтрофированием в 1980-е гг., выразившимся в росте количественных, продукционных характеристик и изменении структуры ценозов; 3) с сокращением антропогенной фосфорной нагрузки на водоем в 1990–2000-е гг. и началом процессов восстановления экосистемы.

Литература

Вислянская И. Г. Фитопланктон Выгозерского водохранилища // Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1978. С. 15–42.

Вислянская И. Г. Северное Выгозеро, река Нижний Выг и озеро Воицкое. Характеристика биоценозов. Фитопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. С. 112–115.

Вислянская И. Г., Харкевич Н. С. Фитопланктон и первичная продукция Выгозерского водохранилища // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. С. 144–165.

Ефременко Н. А. Методологические основы мониторинга. Методы отбора и химического анализа проб воды // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 10–12.

Ивантер Э. В., Моисеева В. П., Моисеева Е. А. Экологический мониторинг сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 270 с.

Изменение режима Северного Выгозера и реки Нижний Выг под действием сточных вод Сегежского ЦБК и допустимый объем их сброса. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1989. 36 с.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 286 с.

Куликова Т. П. Зоопланктон Выгозерского водохранилища // Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1978. С. 58–79.

Куликова Т. П. Сравнительная характеристика влияния сточных вод целлюлозно-бумажного предприятия на зоопланктон водохранилища до и после внедрения биологической очистки: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1983. 22 с.

Куликова Т. П. Северное Выгозеро, река Нижний Выг и озеро Воицкое. Характеристика биоценозов. Зоопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. С. 115–119.

Лозовик П. А. Взаимодействие донных отложений Северного Выгозера с водой // Органическое

вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. С. 61–84.

Лозовик П. А. Северное Выгозеро, река Нижний Выг и озеро Воицкое. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. С. 101–109.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

Михеева Т. М., Ковалевская Е. В., Лукьянова Е. В. Показатели количественного развития и функционирования фитопланктона Нарочанских озер в разные периоды эволюции их трофического статуса // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 199–211.

Моисеева Е. А. Эколого-токсикологическая оценка влияния сточных вод целлюлозно-бумажного производства на водные организмы (по анализу работы Сегежского ЦБК): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2005. 29 с.

Остапеня А. П. Деэвтрофирование или бентификация? // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III междунар. науч. конф. (Минск – Нарочь, 17–22 сент. 2007 г.). Минск, 2007. С. 31–32.

Полякова Т. П. Северное Выгозеро, река Нижний Выг и озеро Воицкое. Характеристика биоценозов. Макрозообентос // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мо-

нитинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. С. 119–121.

Решетников Ю. С. Проблема ре-олиготрофирования водоемов // Водные ресурсы. 2004. Т. 44, № 5. С. 709–711.

Соколова В. А. Донная фауна Выгозерского водохранилища // Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1978. С. 89–103.

Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 209 с.

Филимонова Н. А. Микробиологическая и санитарная характеристика водоемов – приемников сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1969. С. 66–75.

Филимонова Н. А. Микробиологическая характеристика Выгозерского водохранилища // Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1978. С. 4–14.

Харкевич Н. С. Влияние сточных вод Сегежского целлюлозно-бумажного комбината на химический состав и качество вод р. Сегежи и Выгозера // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1969. С. 30–59.

Jeppesen E., Jensen J. P., Søndergaard M. Response of phytoplankton, zooplankton and fish to re-oligotrophication // An 11-year study of 23 Danish lakes. *Aquat. Ecosys. Health & Mgmt.* 2002. N 5. P. 31–43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Теканова Елена Валентиновна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: etekanova@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Лозовик Петр Александрович

зав. лаб. гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Калинкина Наталия Михайловна

зав. лаб. гидробиологии, д. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: kalina@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Куликова Тамара Павловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
тел.: (8142) 576520

TeKanova, Elena

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: etekanova@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Lozovik, Pyotr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Kalinkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kalina@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Kulikova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576520

Полякова Тамара Николаевна

главный гидробиолог
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: TNPVVL@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Рябинкин Александр Валентинович

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Sorbus08@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Сластина Юлия Леонидовна

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: slastina.jul@yandex.ru
тел.: (8142) 576520

Тимакова Тамара Михайловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ttm49@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Чекрыжева Татьяна Александровна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Tchekryzheva@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Polyakova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: TNPVVL@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Ryabinkin, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Sorbus08@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Slastina, Yulia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: slastina.jul@yandex.ru
tel.: (8142) 576520

Timakova, Tamara

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ttm49@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Chekryzheva, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Tchekryzheva@mail.ru
tel.: (8142) 576520

УДК 556.555.4

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО И КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМОВ МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА ЗИМОЙ

**Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова, Н. И. Пальшин,
А. Ю. Тержевик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Формирование зимнего термического и кислородного режимов небольшого озера Вендюрского (юг Карелии) рассмотрено на основании анализа данных трехлетних экспедиционных исследований, проведенных с использованием высокоточного автономного оборудования. Спектральный анализ позволил выделить основные периоды изменчивости температуры, содержания растворенного кислорода и давления, составившие от нескольких минут до 1–12 сут. Показано, что ведущую роль в динамике озера зимой играют сейши, возникающие вследствие ветрового воздействия на лед и прохождения барических образований над акваторией озера, адвективный перенос, обусловленный неравномерностью прогрева донных отложений и особенностями батиметрии озерной котловины, а также весеннее конвективное перемешивание.

Ключевые слова: мелководное озеро, термодинамический режим, растворенный кислород, подледный период, внутренние волны.

**R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, N. I. Pal'shin, A. J. Terzhevik.
VARIATION OF THE TEMPERATURE AND OXYGEN REGIMES OF A SHALLOW
LAKE IN WINTER**

Thermal and dissolved oxygen dynamics in a small ice-covered lake Vendyurskoe (South Karelia) are considered on the basis of the data analysis carried out within the three-year field survey conducted with stand-alone precision equipment. Using FFT analysis we identified the main periods of variability of the temperature, dissolved oxygen and the pressure ranged from several minutes to 1–12 days. Seiches, presumably arising from the impact of wind on the ice and the change in atmospheric pressure over the lake, advective transport, caused by uneven heating of sediments and bathymetric features of the lake basin, as well as spring under-ice convective mixing play an important role in the dynamics of an ice-covered lake.

Key words: shallow lake, thermodynamic regime, dissolved oxygen, ice-cover period, internal wave.

Введение

Термический и кислородный режимы покрытого льдом озера формируются в тесной связи с его динамическим режимом. При отсутствии ветро-волнового перемешивания и существенного речного стока важную роль в переносе вещества и энергии внутри водной массы

покрытого льдом озера начинают играть такие процессы, как молекулярная диффузия, конвективный и адвективный перенос. На этапе весенне-летнего нагревания водная масса и верхний слой донных отложений полимиктического озера накапливают тепло, на этапе осеннего охлаждения – отдают его в атмосферу. С появлением сплошного снежно-ледового покрова

теплопотери озера в атмосферу резко уменьшаются, а перенос тепла из донных отложений в воду продолжается, что приводит к повышению температуры придонного слоя воды. На мелководьях теплоток из донных отложений в воду выше, чем в глубоководных частях озер [Malm et al., 1997], поэтому температура воды придонного слоя там повышается быстрее. В связи с тем что при повышении температуры пресной воды от 0 до 4 °С ее плотность возрастает, более теплая и плотная вода с мелководий стекает по склонам дна в глубоководную часть озера; в центральной части озера появляются компенсационные восходящие потоки, так формируется устойчивая плотностная циркуляция, играющая важную роль в переносе тепла и растворенных веществ в условиях пониженного режима перемешивания [Mortimer, Mackereth, 1958; Bengtsson, 1996]. Адвективный перенос тепла, обусловленный неравномерностью прогрева донных отложений и особенностями батиметрии озерной котловины, наиболее значим в первый месяц зимы [Петров и др., 2006; Terzhevik et al., 2009]. Скорость потребления кислорода существенно зависит от температуры и скорости течения [Nakamura, Stefan, 1994], что наряду с большим количеством органического вещества и повышенной бактериальной активностью способствует появлению дефицита кислорода в зоне придонного термоклина [Goloso et al., 2007; Терзевик и др., 2010]. Воздействие ветра на ледовый покров или прохождение над акваторией озера барических образований может приводить к вертикальным смещениям льда и появлению в озере баротропных и бароклинных сейш [Bengtsson, 1986; Malm et al., 1998; Baehr, DeGrandpre, 2002; Петров и др., 2007], трансформирующихся вследствие батиметрических особенностей котловины в поступательные волны и участвующих в переносе вещества и энергии внутри водной толщи озера. Внутренние волны могут существенно усиливать процессы перемешивания в придонных слоях озер [Kirillin et al., 2009]. Весеннее подледное конвективное перемешивание [Matthews, Heaney, 1987; Mironov et al., 2001], проникающее на значительную глубину, играет важную роль в переносе тепла, растворенных веществ и газов [Kenney, 1996; Baehr, DeGrandpre, 2004]. Следует отметить, что, в отличие от термики, динамика покрытых льдом озер изучена слабо. Из опубликованных данных известно, что скорости течений в озере подо льдом невелики, имеют порядок от долей до нескольких мм в секунду [Malm et al., 1998], для измерения которых требуется прецизионное измерительное оборудование [Glinsky, 1998]. Использование

трейсеров дает лишь общее представление о подледной динамике [Colman, Armstrong, 1983; Bengtsson, 1986], поэтому зачастую заключения о зимнем динамическом режиме озера основываются на анализе более доступных и высокоточных измерений температуры и растворенных газов [Kenney, 1996; Baehr, DeGrandpre, 2002]. В настоящей работе рассмотрено формирование зимнего термического, кислородного и динамического режимов небольшого мелководного озера Вендюрского по данным трех последовательных лет наблюдений.

Материалы и методы

Объект исследования – озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (62°10' N, 33°10' E). Площадь поверхности озера 10,4 км², объем водной массы 54,8 · 10⁶ м³, средняя и максимальная глубины 5,3 и 13,4 м [Литинская, Поляков, 1975]. Донные отложения представляют собой песок в прибрежной мелководной части озера и илы на больших глубинах. В октябре 2007–2009 гг. в глубоководной части озера на глубинах 11,1–11,45 м и на склоне на глубинах 6,88–7,5 м устанавливались косы, оснащенные высокочувствительными термо- (диапазон –5 ... +35 °С, точность ±0,0002 °С, разрешение <0,00005 °С), кислородными (диапазон 0 ... 150 %, точность ±1 %) и датчиками давления (20 и 100 дБар, точность ±0,05%, разрешение <0,001 %) производства канадской фирмы «RBR Ltd.» (рис. 1, табл.). Калибровка кислородных датчиков проводилась после замены мембран непосредственно перед установкой приборов в озеро. Дискретность измерений по времени – одна минута, дискретность расположения датчиков по вертикали – от нескольких см в придонных слоях до 1,0–1,5 м в водной толще. Косы удерживались в месте постановки грузом и плавающим в 1,5 м от поверхности бум. На момент постановки верхний датчик на косах располагался в 2,0–2,5 м от поверхности воды. Косы находились в озере

Сведения о термокосах, установленных в озере Вендюрском в 2007–2010 гг.

Период измерений	Станция, глубина, м	Измеряемые параметры
21.10.2007–26.05.2008	«Длинная» коса, 11,1 м	Т, РК, Р
19.10.2008–01.06.2009	«Короткая» коса, 6,88 м	Т, Р
17.10.2009–18.06.2010	«Длинная» коса, 11,45 м	Т, РК, Р
	«Короткая» коса, 7,40 м	Т, Р
	«Длинная» коса, 11,45 м	Т, РК, Р
	«Короткая» коса, 7,20 м	Т, РК, Р
	Станция 4-3, 7,5 м	Т, РК, Р

Примечание. Т – температура, РК – растворенный кислород, Р – давление.



Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Вендюрского и положений термоксов в 2007–2010 гг:

1 – ст. 4-3, 2 – «длинная» коса, 3 – «короткая» коса

до конца мая – начала июня. В анализе погодных условий использовались данные (скорость ветра, атмосферное давление, дискретность измерений – 3 ч) по наиболее близко расположенной к району исследований метеостанции «Петрозаводск» (индекс WMO: 22820), полученные из архива погодных условий (<http://meteo.infospace.ru>).

Результаты и обсуждение

Эволюция температурного и кислородного режимов озера в течение трех последовательных зим имела сходный характер. До ледостава озеро охлаждалось в состоянии гомотермии, за исключением тонкого придонного слоя воды толщиной несколько см, в котором сохранялся градиент температуры, достигающий до $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^{-1}$. Содержание растворенного кислорода (РК) по всей водной толще было равномерным и при 95%-ном насыщении составляло $12,5\text{--}13,5\text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Замерзло озеро 14 ноября 2007, 12 декабря 2008, 11 ноября и 5 декабря 2009 г. при средней температуре воды около $0,6, 0,5, 0,4$ и $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. С первых же дней после замерзания наблюдалось повышение температуры и уменьшение содержания РК по всей водной толще, наиболее заметное в придонных слоях глубоководной части озера. К концу зимы за счет теплообмена с донными отложениями и перераспределения тепла адвективными течениями температура придонных слоев в глубоководной части озера на глубинах

$10\text{--}11\text{ м}$ повышалась до $4,5\text{--}5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, на склоне в районе глубин $7,0\text{--}7,5\text{ м}$ – до $2,5\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оценки изменения теплосодержания столба воды по данным трех лет наблюдений показали, что в глубоководной части озера оно растет быстрее, а на склоновых станциях медленнее, чем следовало бы из разницы потоков на границах вода – лед и вода – дно, что косвенно подтверждает наличие в озере в течение зимы адвективного переноса тепла с мелководных участков в глубоководную часть. Подобный результат отмечен и в предыдущие годы измерений на озере [Malm et al., 1997; Zdorovenkova, 2009]. Как было показано ранее, ведущая роль в уменьшении содержания РК в водах озера зимой принадлежит его биохимическому потреблению [Тержевик и др., 2010]. Дефицит кислорода в придонных слоях глубоководной части озера появлялся уже в конце первого месяца ледостава, а к концу зимы толщина анаэробной зоны превышала $0,5\text{ м}$. На склоне на глубинах $7,0\text{--}7,5\text{ м}$ к концу зимы наблюдалось снижение содержания РК в придонном слое $0,5\text{ м}$ толщины до $2\text{--}6\text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Оценки суммарной скорости процесса потребления РК γ были выполнены по уравнению [Тержевик и др., 2010]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\gamma C \quad (1)$$

где C – концентрация РК, γ – суммарная скорость потребления РК; $[\gamma] = \text{с}^{-1}$, t – время. Уравнению (1) соответствует аналитическое решение:

$$C = C_0 e^{-\gamma t}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация РК в момент установления ледового покрова.

Наибольшие скорости потребления РК в 2008–2009 и 2009–2010 гг. наблюдались в течение первого месяца ледостава и имели порядок $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, затем значения γ очень быстро уменьшались и с конца первого месяца ледостава до конца зимы не превышали $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, что неплохо согласуется с расчетными значениями γ для зимы 2007–2008 гг., приведенными в [Тержевик и др., 2010].

Весенняя подледная конвекция начиналась в конце марта – начале апреля. Подо льдом формировался квазиоднородный конвективный слой, толщина и температура которого повышались на 0,1–0,5 м и 0,1–0,3 °C за сутки, соответственно. По мере вовлечения в конвективное перемешивание нижележащих слоев происходило выравнивание содержания РК по вертикали и уменьшение толщины анаэробной зоны в глубоководной части озера. Вскрытие ледового покрова происходило 10 мая 2008, 8 мая 2009, 1 мая 2010 г., после чего наблюдалось полное перемешивание водной толщи озера от поверхности до дна и исчезновение придонной анаэробной зоны в глубоководной части озера. В качестве примера на рис. 2 приведено изменение температуры и содержания РК в глубоководной части оз. Вендюрского зимой 2008–2009 гг.

В течение трех лет наблюдений на фоне сезонного увеличения температуры воды и уменьшения содержания РК отмечались их флуктуации с периодами от нескольких минут до нескольких дней и амплитудой 0,01–0,5 °C и 0,2–1,5 мг · л⁻¹, соответственно. Максимальные по амплитуде колебания температуры регистрировались в тонком придонном слое толщиной 0,20–0,25 м как в глубоководной части озера, так и на склоновых станциях. Наибольшая

амплитуда колебаний содержания РК отмечалась в поверхностном слое водной массы. Колебания температуры с периодами 6–16 и 25–30 мин и амплитудой 0,01–0,02 °C отмечались на протяжении большей части зимних месяцев 2007–2010 гг. по всей водной толще; в придонном слое глубоководной части озера амплитуда таких колебаний была несколько выше (0,02–0,04 °C), а в придонном слое склоновой станции в январе – марте 2009 г. достигала 0,1–0,2 °C (рис. 3, а). Флуктуации содержания РК с амплитудой 0,2–0,8 мг · л⁻¹ и периодом 25–30 мин отмечались на протяжении всех зим в поверхностных слоях водной толщи озера (рис. 3, б). Наряду с осциллирующими, были зафиксированы отличные по форме, амплитуде и периоду колебания температуры в тонком придонном слое толщиной 0,20–0,25 м в глубоководной части озера. Резкое падение температуры на 0,2–0,8 °C в течение 5–20 мин сменялось плавным повышением в течение нескольких часов до исходного значения. Такие скачки температуры повторялись через 12–26 ч (рис. 3, в) и регистрировались в течение 2–3 недель в декабре 2007, феврале и декабре 2008, марте – апреле и декабре 2009, январе – феврале 2010 г. Также была зарегистрирована долгопериодная изменчивость содержания РК в поверхностном слое озера: на фоне незначительного сезонного понижения периодически отмечалось повышение содержания РК на 1,0–1,5 мг · л⁻¹ продолжительностью от нескольких часов до нескольких дней с последующим понижением до исходных значений (рис. 3, г).

Спектральный анализ рядов температуры, содержания РК и давления показал наличие пиков на частотах, соответствующих периодам от нескольких минут до нескольких дней. На спектрах придонной температуры глубоководной станции выделялись два основных энергонесущих пика на частотах, соответствующих перио-

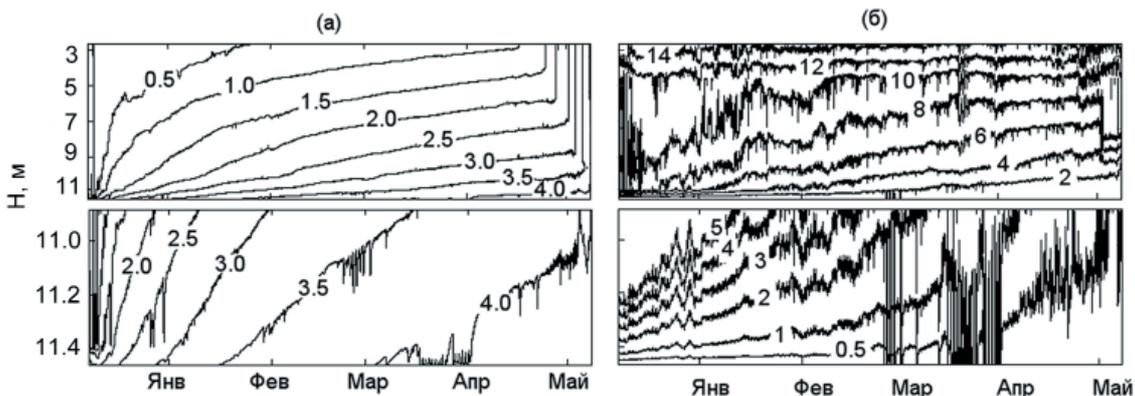


Рис. 2. Изменение температуры (а) и содержания РК (б) в глубоководной части оз. Вендюрского зимой 2008–2009 гг. («длинная» коса, глубина 11,45 м)

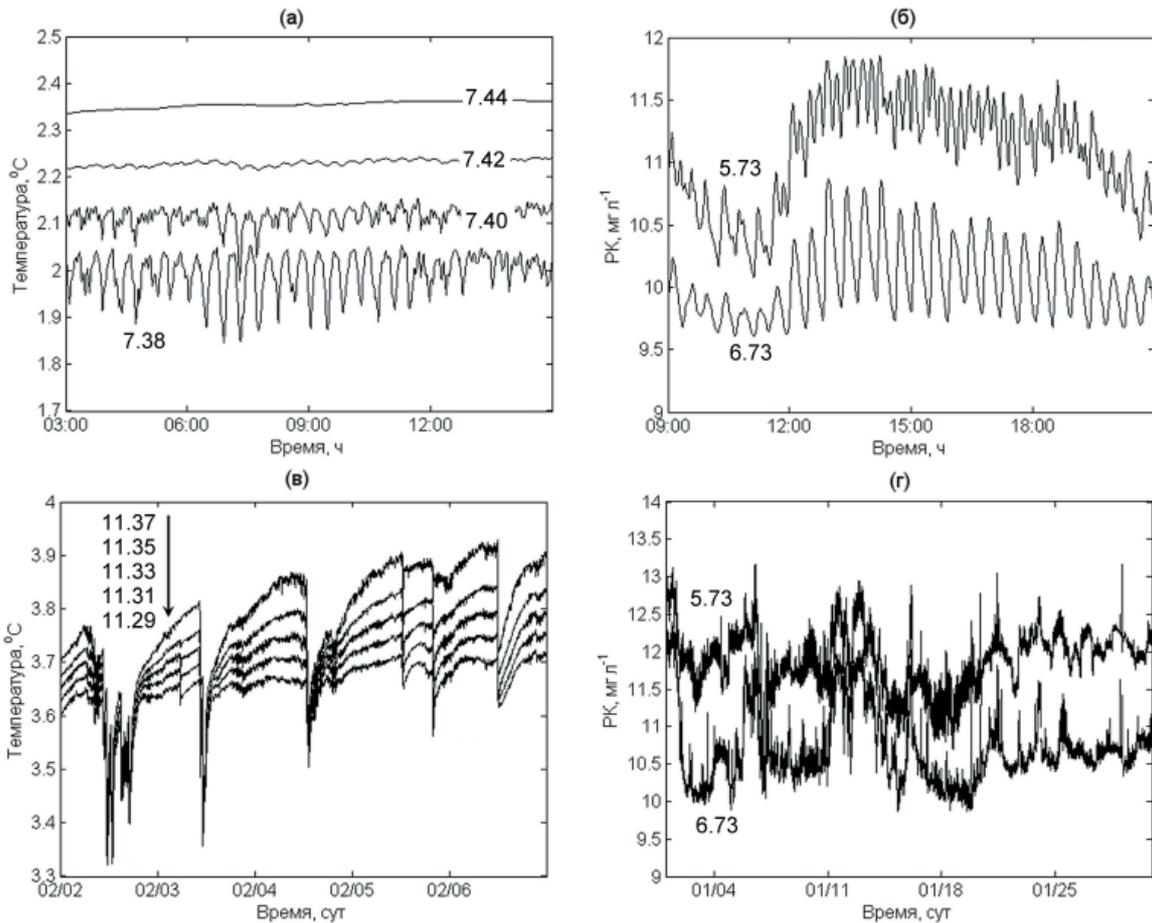


Рис. 3. Колебания температуры (а, в) и содержания РК (б, г):

а – 20 января 2009 г. в придонном слое «короткой» косы; б – 4 марта 2009 г. на «длинной» косе; в – 2–6 февраля 2010 г. в придонном слое «длинной» косы; г – 1–31 января 2009 г. на «длинной» косе. На рис. приведены глубины горизонтов наблюдения, м

дам в 24 и 12 ч; на склоновых станциях хорошо разрешались пики 6, 16 и 26 мин, 2, 8, 12 и 24 ч колебаний. На спектрах содержания РК в поверхностном слое хорошо выделялись пики, соответствующие 26 и 6 мин изменчивости, а также периодичностям в 2–4, 10–11, 22–25 ч, 2, 2,5 и 7–10 сут. На спектрах давления выделялось 3–4 энергонесущих пика на низких частотах, соответствующих периодам 1,4–2,5, 4,5–5, 7, 11–12 сут. Измерения течений на разных глубинах, проводившиеся на оз. Вендюрском в зимние месяцы 1994–1996 гг., показали наличие осциллирующих колебаний с периодами около 6–7 и 28–29 мин и скоростями от долей до нескольких мм в секунду [Malm et al., 1998]. Рассчитанный по формуле Мериана период первой моды продольной и поперечной баротропных сейш оз. Вендюрского составляет 29 и 7 мин, соответственно [Malm et al., 1998]. Хорошее совпадение периодов осциллирующих колебаний температуры и содержания РК с периодом баротропной сейши позволяет говорить о том, что сейши в озере существуют на протяжении большей части зимы, периодически усиливаясь или

затухая. Полное исчезновение сейшеобразных колебаний температуры в штилевых условиях и последующее их возобновление по мере роста скоростей ветра подтверждает гипотезу о том, что сейши в озере генерируются колебаниями ледового покрова под воздействием ветра.

Причины появления резких скачков температуры в придонных слоях оз. Вендюрского не вполне ясны. Колебания температуры с периодами 11 и 24 ч и амплитудой 0,5–1,1 °C регистрировались в придонном слое оз. Мюггелзее (Берлин) на протяжении первого месяца ледостава 2005–2006 гг. [Kirillin et al., 2009]. Оценки числа Бургера для двух выделенных частот колебаний оказались близкими, что позволило авторам с большой долей уверенности интерпретировать выделенные частоты как внутренние инерционно-гравитационные волны типа Кельвина и Пуанкаре, появившиеся в озере до ледостава на придонном термоклине вследствие ветрового воздействия. Форма и амплитуда колебаний температуры в придонном слое озер Вендюрского и Мюггелзее отличаются, совпадает только период колебаний.

Для стратифицированных систем внутренней радиус деформации Россби определяется как

$$R = \frac{c}{f}, \quad (3)$$

где c – фазовая скорость распространения внутренней волны, f – инерционная частота.

Скорость распространения внутренней волны в двухслойной жидкости можно определить из соотношения

$$c = \sqrt{g' \frac{h_1(H-h_1)}{H}}, \quad (4)$$

где

$$g' = \frac{g\Delta\rho}{\rho_0} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_m} = \frac{1}{2} a \left[(T_1 - T_m)^2 - (T_2 - T_m)^2 \right], \quad (6)$$

где h_1 – толщина верхнего слоя, H – общая толщина столба воды, $a = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ – константа в уравнении состояния пресной воды [Carmack, Farmer, 1982], $T_m = 3,98 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\rho_m = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – температура максимальной плотности и максимальная плотность пресной воды, соответственно.

Принимая общую толщину столба воды $H = 13 \text{ м}$, толщину верхнего слоя $h_1 = 6 \text{ м}$, $\Delta T = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (условия середины первого месяца ледостава на оз. Вендюрском), получим $\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 9,5 \cdot 10^{-5}$, $g' = 9,3 \cdot 10^{-4}$ и $c = 0,054 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; при $h_1 = 3 \text{ м}$, $\Delta T = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ (второй месяц ледостава) $\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 9,1 \cdot 10^{-5}$, $g' = 8,9 \cdot 10^{-4}$ и $c = 0,045 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

На широте оз. Вендюрского $f = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$, для значений c $0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ величина R составляет 400 м , что намного меньше ширины бассейна. Следовательно, вращение Земли может оказывать влияние на внутренние волны в условиях плотностной стратификации, формирующейся в озере подо льдом. Два основных энергонесущих пика колебаний температуры в придонном слое оз. Вендюрского (24 и 12 ч) близки к инерционной частоте (период, соответствующий частоте инерционных колебаний на широте района исследований составляет $13,6 \text{ ч}$), что позволяет предполагать возможность существования в озере инерционно-гравитационных волн.

Долгопериодные колебания содержания РК в поверхностных слоях оз. Вендюрского могут быть обусловлены бароклинной сейшей, периоды которой для разных лет исследований оценивались в 3 – 11 сут [Петров и др., 2006; Zdorovenkova, 2009]. Колебания температуры,

содержания РК и углекислого газа в водах оз. Плесид (Монтана) с периодом около 6 – 8 сут в зимние месяцы 1997 и 1998 г. были интерпретированы авторами как проявление бароклинной сейши. Авторы высказывают предположение о связи колебаний льда под воздействием ветра с появлением сейш в озере. Анализ спектров давления и скорости ветра по станции Петрозаводск показал периодичности от 3 до 15 сут , в спектре ветра также был выражен пик суточной изменчивости. Поскольку низкочастотные пики на спектрах давления и содержания РК нередко совпадают, возможно, что долгопериодные колебания содержания РК в поверхностном слое обусловлены горизонтальным переносом, появляющимся в озере в моменты прохождения над его акваторией барических образований, однако механизм такого взаимодействия неясен.

Выводы

Анализ данных трех последовательных лет измерений температуры, содержания РК и давления в небольшом замерзающем озере показал сходный характер эволюции термического и кислородного режимов озера в течение зимы. Высокая точность измерений и небольшой шаг по времени позволили выявить ряд особенностей динамического режима озера зимой, его связь с изменчивостью погодных условий района исследований. Показано, что баротропные сейши существуют в озере на протяжении большей части зимы и проявляются в колебаниях как температуры, так и содержания РК. Бароклинные сейши предположительно являются причиной долгопериодной изменчивости содержания РК в поверхностном слое озера. Близость частот колебаний температуры в тонком придонном слое к инерционной частоте позволяет предполагать существование инерционно-гравитационных волн. Выяснение причин появления таких волн в озере, покрытом льдом, а также роли погодных условий в формировании динамики водоема зимой является предметом дальнейших исследований.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-91331-ННИО_а).

Литература

Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1975. С. 57–66.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Baehr M. M., DeGrandpre M. D. Under-ice CO₂ and O₂ variability in a freshwater lake // Biogeochemistry. 2002. Vol. 61. P. 95–113.

Baehr M. M., DeGrandpre M. D. In situ pCO₂ and O₂ measurements in a lake during turnover and stratification: Observations and modeling // Limnol. Oceanogr. 2004. Vol. 49, N 2. P. 330–340.

Bengtsson L. Dispersion in ice-covered lakes // Nordic Hydrology. 1986. 17. P. 151–170.

Bengtsson L. Mixing in ice-covered lakes // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 91–97.

Carmack E. C., Farmer D. M. Cooling processes in deep temperate lakes: a review with examples from two lakes in British Columbia // J. Mar. Res. 1982. Vol. 40. P. 85–111.

Colman J. A., Armstrong D. E. Horizontal diffusivity in a small, ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 1983. Vol. 28, N 5. P. 1020–1026.

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, N 7. P. 1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43, N 3. P. 641–651. DOI: 10.1007/s10452-009-9274-3.

Kenney B. C. Physical limnological processes under ice // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 85–90.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes // Nordic Hydrol. 1997. Vol. 28. P. 129–152.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, N 7. P. 1669–1679.

Matthews P. C., Heaney S. I. Solar heating and its influence on mixing in ice-covered lakes // Freshwater Biology. 1987. Vol. 18. P. 135–149.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G. et al. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 107, N C4. P. 7-1–7-16.

Mortimer C. H., Mackereth F. J. H. Convection and its consequences in ice-covered lakes // Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie. 1958. Vol. 13. P. 923–932.

Nakamura Y., Stefan H. G. Effect of Flow Velocity on Sediment Oxygen Demand: Theory // J. of Env. Eng. 1994. Vol. 120, N 5.9. P. 96–1016.

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N. et al. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquat. Ecology. 2009. 43: DOI 10.1007/s10452-009-9288-x.

Zdorovenнова G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43. P. 629–639. DOI 10.1007/s10452-009-9277-0.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здоровеннов Роман Эдуардович

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga1974@rambler.ru
тел.: +79212209438

Здоровеннова Галина Эдуардовна

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: +79214602171

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru
тел.: (8142) 576381

Терзевик Аркадий Юрьевич

зав. лаб. гидрофизики, к. т. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ark@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: +79217267356

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga1974@rambler.ru
tel.: +79212209438

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: +79214602171

Pal'shin, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru
tel.: (8142) 576381

Terzhevik, Arkadiy

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: +79217267356

УДК 574.57 (470.22)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФАУНЫ ОНЕЖСКОГО И ЛАДОЖСКОГО ОЗЕР (краткий обзор)

З. С. КАУФМАН

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Рассматриваются основные группы фауны Ладожского и Онежского озер: рыбы, моллюски, ракообразные и олигохеты, пути их формирования. Они были различными не только в этих озерах, но и в каждом из них и зависели от климатических и геологических характеристик. В ряде случаев особенности фауны не подтверждают принятую в настоящее время плейстоценовую или голоценовую геологическую обстановку района. Большая морфологическая схожесть реликтовых ракообразных и рыб Ладожского озера со своими морскими предшественниками рядом авторов объясняется более длительной связью его с морем, но она может быть обусловлена и в два раза большей минерализацией его вод, по сравнению с онежскими. Показано, что ряд морских реликтов таковыми не являются.

Ключевые слова: Ладожское озеро, Онежское озеро, фауна, рыбы, моллюски, ракообразные, олигохеты, формирование, регрессия моря, трансгрессия моря, оледенения.

Z. S. Kaufman. SOME ASPECTS OF THE FAUNA FORMATION IN LAKES ONEGO AND LADOGA (review)

Characteristic representatives of the fauna of lakes Ladoga and Onego are considered: fishes, molluscs, crustacea and oligochaeta. The pathways of their formation varied not only between the lakes, but also within them depending on the geological history and climate. In some cases, characteristics of the fauna disagree with the presumable Pleistocene or Holocene age of the geological conditions of the area. Some authors attribute the great morphological similarity of relic crustaceans and fishes of Lake Ladoga with the marine predecessors to its longer connection to the sea, but it may be due also to the twice greater mineralization of its waters as compared with Onego. It is shown that some of the sea relicts are not in fact sea relicts.

Key words: lake Ladoga, lake Onego, fauna, fish, mollusks, Crustacea, Oligochaeta, origin, regress of the sea, transgression of the sea, freezing.

Несмотря на то что Онежское и Ладожское озера расположены рядом и соединяются между собой р. Свирью, их фауна имеет некоторые существенные различия. Ряд видов, обитающих в Ладожском озере, в Онежском не встречаются: например, тюлень, морской таракан, некоторые виды рыб, дафний и др., а многие виды, общие для обоих озер, имеют разные пути проникновения и обнаруживают заметные морфологические различия. Более того, фау-

на каждого из этих озер также неоднородна по своему происхождению и времени заселения.

Как хорошо известно [Кудерский, 1971, 1972, 1990а, б, 2005; Квасов, 1975, 1986, 1990 и др.], важнейшим фактором формирования и генезиса пресноводной фауны Фенноскандии являются масштабные голоценовые геологические преобразования, имевшие место в бассейнах Белого и Балтийского морей, и вызванные ими трансгрессии и регрессии морей.

Так, между Датским и Готским оледенениями (13 тыс. лет назад) вследствие таяния ледников Балтийская котловина наполнилась тальми водами и превратилась в огромное Балтийское Ледовое море-озеро, или Рыбное озеро. На востоке оно соединялось с Ладожским озером и достигало бассейна Волги. Но вследствие отступления ледника образовался сток через озеро Веттерн к озеру Веннер, которое в то время было морским заливом. При этом уровень Ледового озера понизился до уровня океана, и в него с Северного моря стали поступать массы холодной морской воды, что привело к образованию Йольдиевого моря (названного по характерному для него холодолюбивому морскому моллюску *Yoldia arctica*). В отношении распространения моря в северо-восточном направлении и до настоящего времени нет единого мнения. Одна группа исследователей [Герд, 1946; Гордеев, 1949 и др.] считает, что Ладожское и Онежское озера через Йольдиевое море соединялись с Белым морем (Ловенов пролив), что создало возможность для проникновения в эти озера холодолюбивых высокоарктических морских форм. Однако другие авторы [Ломакина, 1952; Бискэ, 1959; Ярвекюльг, 1962; Кудерский, 1971, 1972, 1990б; Квасов, 1990 и др.] отрицают существование такого пролива да и вообще самого Йольдиевого моря [Квасов, 1990]. Они считают, что если оно и было, то не распространилось дальше Ладожского озера.

По их представлениям, во время последнего межледниковья (Микулинского, или Рисс-Вюрмского) произошло погружение Балтийского щита, вызвавшее сильнейшую трансгрессию, в результате которой территория Карелии и на юг вплоть до Валдайской возвышенности была залита водами огромного Мгинского моря, и именно это был единственный случай осолонения вод Онежского и Ладожского озер. Во время отступления ледников последнего оледенения их котловины заполнились тальми водами приледниковых бассейнов, что и привело к их полному опреснению.

На территории Балтийского бассейна в период от бореальной фазы и до субатлантической возникло и исчезло еще несколько морей и озер-морей (Анциловое озеро-море, Мастоговое, Литториновое и другие моря). Тем не менее наличие в Онежском и особенно в Ладожском озере значительного количества морских реликтов в значительной степени затрудняет понимание происхождения их биоты. Так, в позднеледниковых отложениях этих озер обнаружена относительно богатая морская диатомовая флора [Давыдова, 1968, 1976; Лак, 1976, 1980 и др.], что свидетельствует о том, что мор-

ские воды и после существования Мгинского моря все же доходили до котловин этих озер.

Если принять теорию об отсутствии пролива между Балтийским и Белым морями, то остается малопонятным происхождение гидробионтов, общих для этих морей, но отсутствующих в Баренцевом море или даже в Норвежском. Причем среди них имеются не только арктические холодноводные формы, но и бореальные теплолюбивые (морская трава *Zostera marina*, перидиния *Pyrophacus horologicus*, диатомея *Caetocerus danicum*, очень крупные формы теплолюбивой полихеты *Nereis virens* и др.) [Зенкевич, 1963].

Особый интерес представляют ископаемые онежско-ладожские морские реликты. Так, в почве в окрестностях Петрозаводска в большом количестве встречаются хорошо сохранившиеся раковины морских двустворчатых моллюсков амфибореальных *Macoma baltica* (L. 1758) и *Tellina calcarea* (Chemn. 1780) – возможных реликтов Литторинового моря – и холодолюбивых высокоарктических *Cardium ciliatum* Fabr., *Yoldia (Portlandia) arctica* (Gray 1842) и др. [Берг, 1962], что также может служить еще одним доказательством связи Онежского озера с холодноводным морем, возможно, Йольдиевым. Кроме того, на территории бывшего Литторинового моря обнаружены ископаемые остатки тюленей (*Phoca groenlandica*, *Ph. hispida*, *Ph. phoetida*, *Ph. vitulina* и *Halichoerus gripus*) [Зенкевич, 1963]. Три первых вида являются ледовитоморскими, обитателями Крайнего Севера, а два последних распространены в умеренных и холодных водах Северной Атлантики, но имеют балтийские подвиды. Такое сочетание североморских (беломорских) и балтийскоморских подвидов может служить еще одним доказательством существования связи Белого и Балтийского морей. В настоящее время тюлень (*Phoca hispida*) существует лишь в Ладожском озере. Причина отсутствия нерпы в Онежском озере не ясна. Ее связывают с менее продолжительным, по сравнению с Ладожским озером, контактом с Йольдиевым морем. Л. С. Берг [1962] предполагает, что это море захватывало Ладожское озеро, но не распространялось на Онежское. Однако трудно себе представить, как Йольдиево море, распространяясь в северном направлении, захватив Ладожское озеро, обошло Онежское. Многочисленные голоценовые ископаемые представители морской флоры и фауны, обнаруженные на побережье Онежского озера, также не согласуются с этим предположением. К тому же в Онежском озере представители арктического фаунистического комплекса рыб составляют 21,6 %, а в

Ладожском – 17,8 %, понтического – соответственно 13,5 и 20 %, т. е. в Онежском озере холодолюбивый комплекс представлен богаче, чем в Ладожском. Больше и рыб морского комплекса – 10,8 и 8,9 % [Китаев, Стерлигова, 2001]. И это также может свидетельствовать о связи Онежского озера с ледовитоморской областью.

В этом плане определенный интерес представляет анализ ихтиофауны. Так, ее общий характер на северо-западе Европы, по-видимому, уже сложился в плиоцене на основе Западно-Сибирского и Понто-Арало-Каспийского ихтиологических комплексов. Однако наступившие оледенения резко изменили характер всей биоты района, сдвинув ее ареалы далеко на юг. Особенно чувствительно это затронуло теплолюбивые формы. Их ареал был фрагментирован и сильно сокращен. Рефугиями для холодолюбивых форм служили приледниковые или околледниковые озера, а также высокогорные холодные озера. В этих водоемах находили убежище лососи, сиги, палии, форели и др. В них же сформировались и различные формы сигов, а также европейская ряпушка, озерные корюшки, онежская рогатка и др. В послеледниковое время вслед за отступанием ледников этот холодноводный комплекс продвигался на север Фенноскандии, а за ними восстанавливали бывшие ареалы и бореальные формы [Кудерский, 1990а, 2003, 2005]. В Ладожском озере и его бассейне обитает 43 вида рыб и круглоротых, в Онежском – 38 [Кудерский, 1990а, 2005]. В Онежском озере и в его бассейне нет ни одного вида рыб, не встречающегося в Ладожском. Белоглазка *Abramis sapa* (Pallas 1814), жерех *Aspius aspius* (L. 1758), верховка *Leucaspis delineatus* (Heckel 1843), сырть *Vimba vimba* (L. 1756) и выюн *Misgurnus fossilus* (L. 1756) в Онежском озере отсутствуют. Для этих видов Ладожское озеро является северной границей их ареала, и здесь они весьма немногочисленны. Несмотря на большую общность видового состава, его генезис в обоих озерах различен. Вся их ихтиофауна четко делится на северные холодолюбивые, относительно теплолюбивые (бореальные) и широко распространенные эврибионты. К первой группе относятся такие гляциальные и гляциально-морские реликты, как лосось, форель (кумжа), палия, ряпушка, сиги, хариус, корюшка, налим (единственный пресноводный представитель трескообразных), рогатка, речная и ручьевая миноги. Их ареал, кроме налима, приурочен к бассейнам Белого, Баренцева и Балтийского морей.

Бореальную группу составляют синец, густера, голавль, линь, чехонь, красноперка, пескарь, карась, щиповка, сом, судак и лещ. Они

относятся к волго-каспийскому комплексу. Северная граница их ареала проходит через Карелию и Архангельскую область [Первозванский, 2009 и др.].

Наконец, эврибионтами являются щука, плотва, елец, уклея, голянь, трехиглая и девятииглая колюшки, окунь, ерш и подкаменщик. Три вида – голец усатый, угорь и подкаменщик пестроногий – фоновые, широко распространенные виды, не входящие ни в одну из этих групп [Кудерский, 2005].

При отступании ледников обитание рыб первой группы было связано с приледниковыми водоемами и их бассейнами. В Онежское и Ладожское озера они проникли из разных источников: в Онежское – из Верхневолжского бассейна приледниковых водоемов через Белозерскую озерно-речную систему, а в Ладожское – из Привалдайской.

Виды первой группы начали заселение Онежского озера в позднем плейстоцене, после освобождения его котловины ото льда. Поскольку воды озера в то время были холодными, то первыми вселенцами могли быть лососевые. Позже, в период голоценового климатического оптимума, ихтиофауна Онежского озера пополнилась видами второй группы, т. е. относительно теплолюбивыми. Первая группа должна рассматриваться как гляциальные реликты Микулинского времени, а вторая – как волго-каспийские иммигранты [Кудерский, 1969, 2003, 2005].

К морским реликтам, населяющим озера Карелии, относится четырехрогий бычок, или рогатка *Trigloopsis (Myoxocephalus) quadricornis onegensis* Berg et Popov 1932. Исходная морская форма имеет широкое циркумполярное распространение. В ряде крупных озер Северной Америки и Севера Европы встречаются чисто пресноводные реликтовые формы. Морская форма имеет на голове четыре грибовидных образования (рога). Но при переходе к пресноводной жизни эти выросты дегенерируют до полного исчезновения. Именно такая форма обитает в шведских озерах Веннер и Веттерн, а в Карелии отмечена лишь в шести холодноводных озерах: Ладожском, Онежском, Остер, Сегозере, Маслозере и в Среднем Куйто, представляя реликт анцилового времени (она могла образоваться при опреснении Анцилового моря). В Онежском и Ладожском озерах сформировались свои подвиды [Кудерский, 1969; Дятлов, 2002 и др.]. Бычки остальных озер очень схожи с онежскими и отличаются от ладожских. Ладожская рогатка и рогатка, обитающая в озере Мелар (Швеция), сохраняет больше сходства с морской формой, чем рогатки из других

озер. У нее значительно больше масса и длина тела, крупнее голова с четырьмя выраженными буграми и острыми шипами, имеет выросты, но слабо выраженные, т. е. является промежуточной между морскими и пресноводными формами. Д. Д. Квасов [1990] считает, что еще на стадии, когда Ладожское озеро было приледниковым водоемом, озером Рамзая, в него вселилась рогатка, постепенно приняв форму онежской. Позже вселившиеся рогатки еще не успели принять онежскую форму и остались на ладожской и в настоящее время являются типичными для этого озера. Т. е. ладожская форма существовала еще до ее вселения в Ладожское озеро, а не образовалась в нем. М. А. Дятлов [2002] считает, что большая схожесть ладожской рогатки с морской обусловлена более длительной – на несколько тысяч лет – связью Ладожского озера с морем, чем Онежского. Поскольку обе формы рогатки являются представителями арктической холодолюбивой фауны, то в эти водоемы они могли проникнуть только из холодного моря, а таким было Йольдиево. Но сохранение в Ладожском озере формы, больше схожей с морской, может объясняться и совсем другим фактором, а именно: значительно большей минерализацией его вод (почти в два раза) по сравнению с онежскими.

Сиговые рыбы являются холодолюбивыми полиморфными видами. В озерах западной части бассейна Белого моря широкое распространение получили выходцы со стороны Балтийского моря. Так, ряпушка имеет две формы: европейскую *Coregonus albula* (Linnaeus 1756) и сибирскую *C. sardinella* Valenciennes 1848. Первая является холодолюбивой, аркто-бореальной формой, ее ареал ограничен в основном бассейнами Балтийского и Белого морей. В Карелии населяет почти весь бассейн р. Кеми, озера Куйто, Выгозеро, Сегозеро, Топозеро, Пяозеро (бассейн Белого моря), встречается и в малых озерах. Сибирская форма – ледовитоморская, арктическая, свойственная лишь бассейну Белого моря, и в остальных водоемах Фенноскандии, как и во всем Невском районе, не встречается. Исключение составляет Водлозеро (восточная часть бассейна Онежского озера). Генетическая близость водлозерской ряпушки с сибирской подтверждена методами молекулярной филогении (Боровикова, 2009; Боровикова, Махров, 2009). Центром происхождения ряпушки, как и многих других сиговых рыб, по-видимому, является Восточная Сибирь, Сибирское море-озеро [Боровикова, Махров, 2009], откуда она в голоцене, во время последнего оледенения (9–1 млн лет назад), по мере отступления ледника,

огнивая Уральский хребет с юга, через приледниковые водоемы, проникла в бассейн Балтийского моря. Это стало возможным и потому, что этот огромный сибирский пресноводный водоем соединял верховья Дона, Днепра, Западной Двины, Волги и Восточной Двины, а сток многих сибирских рек шел в направлении Понто-Каспийского бассейна [Решетников, 2010]. (Возможно, что именно это было важнейшим условием и проникновения нерпы в Байкал и Каспий.) Считается, что сибирская ряпушка в бассейн Балтийского моря проникла из бассейна Белого моря [Махров, Болотов, 2006]. Во время отступления ледника южнее или юго-восточней Онежского озера образовался огромный приледниковый водоем, куда проникла сибирская ряпушка и который служил для нее рефугиумом. Здесь и возник эндемический озерный вид и отсюда произошло его заселение Онежского озера, а далее и водоемов восточной части бассейна Балтийского моря и западного побережья Северного Ледовитого океана [Боровикова, 2009].

Сиги из Сибири в Европу попали давно, даже раньше сибирской ряпушки, вероятно еще в плейстоцене, и так же южным путем по системе приледниковых озер. Между обычной формой сига *Coregonus lavaretus* (Linnaeus) и эндемическими *C. baerii* и *C. ludoga* из бассейна Ладожского озера генетических различий не выявлено [Sendek, 2004].

Корюшка *Osmerus eperlanus* (Linnaeus 1757), как сиги и ряпушка, входит в состав арктического пресноводного комплекса. Распространена в Ладожском озере и по всей территории Карелии, имеет западное балтийскоморское происхождение, а в ряде карельских озер (Сегозеро, Сямозеро, Маслозеро, Выгозеро) – антропогенное. Корюшка, обитающая в Ладожском и Онежском озерах, имеет две формы – крупную и мелкую. Крупная форма преимущественно обитает в Ладожском озере, мелкая – в Онежском. Первая рассматривается как реликт Анцилового озера, а мелкая – как происходящая из приледниковых водоемов.

Таким образом, сиги, ряпушки и корюшки бассейна Белого моря имеют балтийскоморское происхождение. Заселение северо-запада Европы сиговыми и корюшковыми могло произойти в послеледниковое время по гидрографической сети, но, возможно, и в результате осолонения огромного Анцилового озера-моря, превращения его в Мастоглоево, а затем и в Литториновое море, что привело к вытеснению его пресноводной фауны в водоемы бассейна, сохранившие пресноводность. Ряпушка и корюшка из бассейна Балтики вселились в бассейн Волги [Махров, Болотов, 2006].

Из лососевых рыб отметим палию *Salvelinus lepechini* (Gmelin 1758) – пресноводную форму арктического гольца *S. alpinus* L., обитающего по всему побережью Северного Ледовитого океана. Палия населяет озера Фенноскандии. В Карелии обитает в Ладожском и Онежском озерах, а также в озерах сегозерской группы. Наличие гольца в Онежском озере можно рассматривать как свидетельство былой связи озера с ледовитоморским бассейном. Не исключено, однако, что заселение гольцами юга Карелии происходило из Центральной Европы, из альпийских озер Швейцарии и Австрии. Прежде гольцы, видимо, заселяли всю Фенноскандию, но в результате последнего оледенения были оттеснены далеко на юг и нашли убежище в холодных горных озерах Альп. На это указывает морфологическое сходство гольцов (палии) Карелии и гольцов Альп [Савваитова, 1981]. Вторичное заселение гольцами севера Европы могло происходить как с юга, так и с севера. Позже гольцы из северной части Онежского озера проникли в бассейн Сегозера, где также существовал приледниковый водоем со стоком в Онежское озеро. О существовании такого пути может свидетельствовать и наличие в сегозерском бассейне онежской рогатки. Заселение гольцами Ладожского озера происходило из Онежского [Первозванский, 1986]. По генетическим исследованиям последнего времени можно предположить, что лосось в бассейн Белого моря (и далее – в Печору) вселился через водораздел Онежского озера и р. Онеги, из рефугиума в восточной части бассейна Балтики [Махров, Болотов, 2006].

Заселение пресноводной ихтиофауны происходило с юга и с запада по мере отступления ледника. Более теплолюбивые виды рыб (карповые, окуневые и др.) проникли в анциловое время, 10 000 лет тому назад. Холодолюбивые (лососи, гольцы, сиви и др.) заселили эти водоемы раньше, в йольдиевое время [Берг, Правдин, 1961]. Однако, по другим представлениям, проходные и полупроходные лососевые, осетровые и некоторые карповые и все виды, обитающие в море, но нерестящиеся в пресных водах, имеют первоначально пресноводное происхождение. Исключение составляет сельдь черноспинка – морской вид, перешедший к нересту в реках.

Синец *Abramis ballerus* (Linnaeus 1758) – теплолюбивая форма. Карелия – это северная граница его ареала. До 1935 г. в Водлозере отмечен не был. В настоящее время распространен в Онежском озере, Сямозере и других водоемах бассейна р. Шуи, а также встречается в Архангельской области (бассейн р. Онеги). Его

распространение на север, вероятно, связано с потеплением климата. Это же относится к красноперке *Scardinius trythrophthalmus* Linnaeus 1758, белоглазке *Abramis sapa* Pallas 1814, жереху *Aspius aspius* Linnaeus 1758 и чехони *Pelecus cultratus* L. Северная граница их ареала обычно проходит по южной и юго-западной части Ладожского озера [Богоцкая и др., 2004; Первозванский, 2009 и др.].

В формировании ихтиофауны Ладожского и Онежского озер определенную роль играла и антропогенная интродукция. Так, из Байкала был интродуцирован байкальский омуль *Coregonus autumnalis* Pallas 1776, из оз. Ендырь – пелядь *Coregonus peled* Gmelin 1789, а из бассейна Волги в Онежское озеро была завезена нельма *Stenodus leucichthys* Gldenstdt 1772 [Кудерский, 2001]. В 1960 г. в Онежское и Ладожское озера вселили севанскую форель *Salmo ischchan*, а в 1932 г. в Онежское озеро из бассейнов Волги и Урала – белорыбицу *Stenodus leucichthys*, в Ладогу – сибирский чукучан *Catostomus catostomus rostratus*. Однако последние виды не прижились [Кудерский, 2001].

Интереснейшими объектами фауны Онежского и Ладожского озер являются гляциально-морские реликтовые ракообразные. Это высшие раки, которые сами или их родственные формы обитают в Белом или Балтийском море. Они представлены родственными парами, один член которой населяет пресные воды, другой – морские. Такими парами являются *Limnocalanus macrurus* Sars 1863 – *L. grimaldi* Sars 1867, *Mysis relicta* Loven 1868 – *M. oculata* Loven 1868, *Monoporeia (Pantoporeia) affinis* Lindstr (Bousfield) 1855 – *M. femorata* Kroyer, *Relictocanthus (Gammarecanthus) lacustris* Sars 1863 – *R. forficatus* (Sabine), *Saduria (Mesidotea) entomon* (Linne 1758) – *S. entomon* (Linne 1758), *Pallasiola (Pallasea) quadrispinosa* (Sars 1867) – ?. Предполагается, что пресноводные представители этих пар являются остатками фауны послеледникового Йольдиевого моря.

По поводу путей их проникновения в пресные воды нет единого мнения. Одна группа исследователей [Герд, 1946; Гордеев, 1949, 1952, 1965 и др.] считает, что благодаря Ловеновому проливу эти ракообразные проникли в Йольдиево море. После его регрессии какая-то их часть приспособилась к условиям пресных вод и в виде реликтов заселила Ладожское и Онежское озера. Эта теория, однако, не может объяснить распространение этих ракообразных за пределами йольдиевой трансгрессии – в Прибалтике, Северной Польше, Германии, Белоруссии, в верховье Волги. Кроме того,

некоторые озера, где обнаружены эти реликты, находятся выше уровня Йольдиевого моря. Эти и другие факты серьезно осложняют это представление, низведя его роль лишь к исторической, хотя термин «реликты Йольдиевого моря» все еще встречается в литературе.

Интерес представляет теория А. G. Högbohm [1917]. Она предполагает, что предковая морская фауна обитала в межледниковом Мгинском море, существовавшем на месте современных Балтийского и Белого морей. Во время таяния ледников талые воды его распреснили. При этом наиболее эврибионтная часть биоты смогла приспособиться к новым условиям. Уровень воды в этих водоемах достигал отметки водоразделов между Балтийским и Белым морями, а также Каспийским и Черным. Этим «шлюзовым поднятием» объясняется нахождение реликтов в водоемах с высокой отметкой. Поскольку сток при отступании ледника распространялся с востока на запад, то реликты смогли заселить водоемы Западной и Северо-Западной Европы с хорошо развитой гидрографической сетью. В котловине Ладожского озера эти ракообразные появились более 11 тыс. лет назад, когда там размещались воды Ладожского плеса приледникового озера Рамзая, а затем Ладожский залив Балтийского Ледникового озера, т. е. рачки появились в Ладожском озере еще до образования на месте современной Балтики послеледникового Йольдиевого моря. В бассейн Ладоги ракообразные могли проникнуть как из приледниковых водоемов, размещенных южнее, так и из Балтийского Ледникового озера [Кудерский, 1971, 1972, 1990б]. Таким образом, эти гипотезы ведущую роль в формировании реликтового комплекса Фенноскандии отводят ледниковым озерам-посредникам.

Е. Ф. Гурьянова [1939, 1946], S. G. Segestråle [1962] и др. центром возникновения реликтовой фауны также считают ледниковые озера, но расположенные в Сибири. Таким могло быть огромное ледниковое Сибирское озеро-море, существовавшее на территории Западно-Сибирской низменности в период предпоследнего оледенения (около 100 тыс. лет назад). В него из Карского моря и из моря Лаптевых – центров возникновения морских автохтонов – еще во время предпоследнего межледниковья проникли отдельные эврибионты и адаптировались к новым условиям существования. При отступании ледника реликтовые элементы заселили межледниковое море и через него внедрились в Белое море, а затем и в пресноводные водоемы.

Из района Белого моря в послеледниковое время реликты распространились по терри-

тории Северо-Западной Европы. Исключение составляет *Pallasiola quadrispinosa*, которая из Сибирского озера проникла в Байкал (где в настоящее время обитают и остальные представители этого рода), а оттуда реками, преодолев Уральский хребет, достигла Северо-Западной Европы. Из реликтовой фауны Северо-Восточной Европы в Западную первыми мигрировали *Monoporeia affinis*, *Mysis relicta*, *Limnocalanus grimaldi* и *Pallasiola quadrispinosa*. Значительно позже в бассейн Балтийского моря и в озера Европы проникли *Saduria entomon* и *Relictocanthus locustris*.

Разновременность миграции реликтовых рачков подтверждают и некоторые физиологические данные. Так, *M. affinis* и *M. relicta* в эксперименте обнаруживают большую устойчивость к опреснению и большую способность поглощать натрий из сильно разбавленных сред (см. ниже), т. е. в пресные воды они проникли давно, и у них было достаточно времени для выработки соответствующих адаптаций. Их можно отнести к древним, типично пресноводным видам. Но наиболее древней, палеолимнической, формой следует считать палласеолу. Она имеет самое широкое распространение, далеко выходящее за пределы трансгрессий Йольдиевого и Литторинового морей, и наиболее высокую адаптацию к существованию в условиях пресных вод. Ее морской предшественник давно вымер и неизвестен. Этот вид сформировался, видимо, еще до плейстоценового оледенения и уже поэтому не может рассматриваться как реликт Йольдиевого моря. Тем не менее, несмотря на выраженную пресноводность, палласеола в экспериментальном галоградиенте избирает соленость 5 ‰ – самую высокую из соленостей, избираемых другими исследованными ракообразными [Кауфман, 1995]. Этот интересный факт еще ждет своего объяснения. Возможно, здесь имеет место феномен «спящих генов», отвечающих за морской период жизни рачка и проявляющихся при восстановлении прежних условий.

Из калянид особый интерес представляет *Limnocalanus macrurus*. Он населяет пелагиаль крупных водоемов бассейна Балтийского моря и Северного Ледовитого океана, т. е. районы трансгрессии Йольдиевого моря. В связи с его регрессией возник ряд озер, которые постепенно опреснялись. По мере опреснения обитающая в них морская форма лимнокалянуса выжила, но несколько изменилась ее морфология – форма цефалоторокса. Наступившая позже трансгрессия Литторинового моря вновь вызвала его прежнее морское строение. Именно такое произошло с лимнокалянусами,

населяющими Ладожское озеро, в свое время сообщавшееся с водами Литторинового моря и пережившее солоноватоводную фазу. Строение цефалоторокса ладожского *L. macrurus* меньше отклонилось от морской формы, чем у представителей популяции из Онежского озера, Сегозера и других озер Карелии, избежавших длительного осолонения. Для некоторых исследователей [Ломакина, 1952] это служит еще одним доказательством более длительного контакта Ладожского озера с морем, чем Онежского.

Mysis relicta населяет крупные холодноводные озера Фенноскандии, некоторые озера Белоруссии, Смоленской области и Северной Америки, а также Балтийское море и многие северные и западные реки Европы. В Карелии этот рачок встречается в 37 озерах. Происхождение этих озер в большинстве случаев связано с трансгрессиями Белого и Балтийского морей в послеледниковое время. В распространении мизид выделяются два крупных ареала: Беломорско-Онежский и Ладожский, включающий Приладожье и Коткозеро на Онежско-Ладожском перешейке. В остальных озерах он, как и другие представители «гляциально-реликтового комплекса», не обнаружен. Это в определенной степени может служить доказательством отсутствия в послеледниковое время сплошного пролива, соединявшего Белое и Балтийское моря.

Важно отметить, что мизиды в Ладоге крупнее, чем в Онежском озере и других пресноводных водоемах, и в большей степени близки к предковым морским формам. Онежские мизиды имеют более выраженный пресноводный характер [Деньгина, Стальмакова, 1968 и др.], что также объясняется более длительной исторической связью Ладоги с Балтийским морем: связь Онежского озера и некоторых других карельских озер с морем была разорвана раньше, чем Ладожского, т. е. она была менее продолжительной. Ладожские реликты, как и реликты послеледниковой Литторинового моря, значительно моложе, чем таковые из Онеги и других карельских озер. Здесь они рассматриваются как остатки фауны более древнего позднеледникового Йольдиевого моря. Все это приводится как доказательство отсутствия сплошного Беломорско-Балтийского (Ловенового) пролива [Ломакина, 1952; Кудерский, 1990б и др.].

Определенный интерес представляют и их осморегуляторные возможности. Показано, что морская форма мизид способна выдержать распреснение лишь до 4 ‰. У пресноводной формы скорость потери солей ниже, чем у морской. Это может свидетельствовать о том, что

пресноводные мизиды, по-видимому, сформировались давно и успели лучше приспособиться к пресноводным условиям. На это указывает и то, что полунасыщение их натрийтранспортирующей системы происходит при концентрации NaCl в среде около 0,15 мМ/л. Такая величина характерна для пресноводных организмов [Виноградов, 1973, 1976]. Вероятно, мизиды, как и другие гляциально-реликтовые ракообразные, эвригалинность приобрели в эстуариях северных рек или в огромном Сибирском ледниковом озере-море еще в доледниковое время.

Тем не менее молекулярно-биологические исследования [Väinölä, Varsio, 1986; Väinölä, 1986, 1990] показали, что ответвление *M. relicta* от морской предковой формы произошло очень давно, вероятно в олигоцене, т. е. на десятки миллионов лет раньше последнего оледенения, что нарушает всю стройность теории их гляциально-реликтового происхождения. Предполагается, что оледенение они пережили в бассейне Балтики [Махров, Болотов, 2006]. Гляциально-реликтовыми эти формы можно рассматривать лишь в зоогеографическом смысле.

Monoporeia affinis в Фенноскандии отмечена в 70 озерах. Монопорея, обитающая в Ладожском озере, по своим морфологическим особенностям также ближе к солоноватоводным формам Арктического бассейна, чем к видам из Онежского озера. Н. Б. Ломакина [1952] и это объясняет сохранением Ладогой более длительного морского режима. Генетические исследования обнаружили высокий уровень дивергенции пресноводной формы и морской [Махров, Болотов, 2006]. Кариологические исследования показали, что механизмом происхождения *M. affinis* была полиплоидия [Salemaa, 1984; Salemaa, Heino, 1990]. Насыщение систем активного транспорта ионов у монопоarei может происходить при очень незначительных концентрациях натрия в среде [Виноградов, 1973, 1976]. Все это свидетельствует об очень высокой степени ее приспособления к условиям пресных вод, на что потребовалось значительное количество времени. Молекулярно-филогенетические исследования [Väinölä, Varsio, 1986; Väinölä, 1986, 1990] также показывают, что ответвление пресноводной формы монопоarei от морской произошло также очень давно, десятки миллионов лет тому назад, в третичное время, а не в позднем плейстоцене, как это предполагают большинство исследователей, и ее нельзя отнести к ледниковым или йольдиевым реликтам. Распространение монопоarei по пресноводным водоемам произошло также очень давно, вероятно, еще в доледниковое время, через эстуарии северо-западных рек.

Завоевание реликтовыми ракообразными пресных водоемов, по-видимому, шло не по пути Йольдиево море – пресные водоемы, а по пути морские воды Северного Ледовитого океана – солоноватые воды эстуариев – приледниковые озера и предшественники современных водоемов [Виноградов, 1973, 1976]. Такой путь их развития не позволяет называть их морскими гляциальными реликтами, тем более реликтами Йольдиевого моря. Этот термин оправдан лишь по отношению к *Monoporeia femorata* и *Mysis relicta*, являющихся остатками эстуарной полупресноводной фауны Мгинского моря и не проходивших пресноводного этапа (см.: [Кауфман, 2005]).

Relictocanthus lacustris – холодолюбивый вид, населяющий глубокие олиготрофные озера Фенноскандии. Встречается редко, преимущественно на больших глубинах. Механизм осморегуляции развит слабо. Рачок не способен существовать в воде, содержание натрия в которой ниже 6–8 мг/л. Осмотические условия в его марзупии не отличаются от таковых в гемолимфе, что обеспечивает условия развития личинки при солености не ниже 10 ‰ и служит важнейшим механизмом его эвригалинности. По степени развития осморегуляции пресноводная форма реликтокантуса очень близка к морской. Все это свидетельствует о его сравнительно недавнем вселении в пресные водоемы и еще недостаточной адаптации к условиям существования в них. Именно это определяет их малочисленность и редкую встречаемость. В настоящее время реликтокантус рассматривается как исчезающий вид и занесен в Красную книгу Карелии. Онежская популяция реликтокантуса также отличается от ладожской. Последняя менее уклоняется от морской формы, что также объясняется более длительным солоноватоводным периодом в истории Ладожского озера и более ранним опреснением вод Онежского озера. Но, возможно, что и в этом случае это различие обусловлено степенью минерализации их вод.

Из изопод отметим *Saduria (Mesidotea) entomon* (L.) (морской таракан). Эндемик полярного бассейна. Вне пределов Арктики (Каспийское, Балтийское, Охотское, Берингово моря, ледниковые и реликтовые озера) представляет собой реликт, сохраняющий выраженную холодолюбивость. Заселяет эстуарии крупных сибирских рек и бассейна Белого моря. В Фенноскандии известен для Ладожского озера и для шведских озер Веттерн и Мелар, но отсутствует в Онежском, Саймаа и Пяйянне (юг Финляндии). Его пресноводная форма почти ничем не отличается от морской, что свидетельствует

о сравнительно недавнем проникновении этого вида в пресные воды. Это подтверждает и факт высокого содержания солей в моче – до 30 % и потери ионов натрия с мочой, т. е. ренальная реабсорбция у морского таракана еще находится на начальном этапе становления. Садурия и реликтокантус являются сравнительно молодыми неолимиическими формами. В пресные воды они проникли из эстуариев рек, впадающих в северо-восточные моря (Обь, Енисей), в более позднее послеледниковое время и не могут считаться гляциальными реликтами [Кауфман, 2005]. В Ладожское озеро этот вид, вероятно, проник из Балтийского моря или является реликтом Йольдиевого моря. На это указывает его выраженная холодолюбивость. Заселению им Онежского озера, по-видимому, препятствует низкая минерализация его воды, к которой он еще не успел адаптироваться.

Из ветвистоусых ракообразных следует отметить вид *Daphnia magna* Straus 1826. В Карелии встречается редко. Его отсутствие в Онежском озере, по-видимому, вызвано не столько степенью теплолюбивости, сколько низкой минерализацией воды. В Ладожском озере с большей минерализацией он встречается. Дафнии относятся к очень древним палеолимиическим формам. За время своего существования они успели приспособиться к различным типам материковых водоемов, включая и такие экстремальные, как лужи. Показано, что у *D. magna* скорость потери ионов натрия в дистиллированной воде сравнительно высокая, но их покровы способны препятствовать потере ионов из организма, имеет место и реабсорбция ионов из продуктов экскреции. Это дает возможность рачку существовать в водоемах с низкой минерализацией, хотя в экспериментальном галоградиенте он обнаруживает четкое предпочтение к слабосоленой морской воде. Его эфиппиумы не развиваются в водах с низкой минерализацией. Для их развития необходима добавка катионов [Кауфман, 1995, 1996; Кауфман, 2005 и др.]. Возможно, что именно это и служит основным препятствием для развития *D. magna* в Онежском озере.

В последнее время в Ладожском и Онежском озерах в больших количествах появилась байкальская амфипода *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing 1898), вероятно проникшая из бассейна Верхней Волги по Волго-Балтийскому каналу. Не имея серьезных ограничений и будучи эврибионтной, эта амфипода не только образовала устойчивые популяции, но и успешно увеличивает свою численность, заселяя всю прибрежную полосу озер, заметно изменяя сложившуюся структуру ее сообществ.

Появился также и китайский мохнорукий краб *Eriocheir sinensis* (Milne-Edwards 1854). Его размножение и эмбриональное развитие происходит в море, но ювенильные и неполовозрелые особи обитают в реках, нередко поднимаясь на огромные расстояния, до нескольких сотен километров. В пресной воде мохнорукий краб, как и другие катадромные крабы, может существовать главным образом за счет низкой проницаемости покровов для воды и солей, удаления избытков воды в виде мочи и способности жабрами поглощать ионы из очень разбавленных растворов. Однако полностью освоить пресные воды он не может. Этому препятствует неразвитость осморегуляторного аппарата у молодых личиночных форм [Кауфман, 2005]. Первоначальный ареал краба ограничивался Желтым морем, откуда он благодаря деятельности человека расселился почти по всему миру. В р. Вуоксе, впадающей в Ладожское озеро, и в районе Пухтинских островов в Онежском озере он впервые был обнаружен в первой половине 1990-х гг. [Наумов, Бергер, 2004]. Его вселение в Ладожское и Онежское озера, видимо, существенно не отразится на их экосистемах, так как он в них не может создать устойчивую саморазмножающуюся популяцию.

Основу малакофауны Онежского и Ладожского озер составляют виды с европейским (52 %) или западносибирским (24 %) ареалом. В Онежском озере насчитывается 18 видов двустворчатых моллюсков. В основном это представители холодолюбивых родов *Pisidium*, *Neopisidium* и *Euglesa*. Ареал *Neopisidium conventus* (Clessin 1877) связан с низкими температурами, с местами бывших оледенений, населенных реликтовыми ракообразными. Все это делает возможным предположить, что этот вид является реликтом. Северную природу имеют *Euglesa lilljeborgi* (Clessin 1886) и *E. hibernica* (Westerlund 1684). Их распространение ограничивается северными районами, имеющими среднеиюльскую температуру воздуха менее 17–18 °C [Александров, 1965]. *E. lilljeborgi* и *N. conventus* известны в Восточной Сибири начиная с нижнечетвертичных отложений. Следовательно, они пережили оледенение, которое было в то время на этой территории, но оно не было покровным. Вслед за отступанием ледника моллюски проникли на запад. Во время европейских оледенений эти виды двигались впереди наступающего ледника и оказались далеко на юге Западной Европы. Такие холодолюбивые виды, как *Euglesa ruut* и *N. conventus*, как и некоторые холодолюбивые лососевые рыбы (голец), нашли себе пристанище в альпийских холодных озерах. Об этом свидетельствует их

современный аркто-альпийский ареал [Старобогатов, 1970]. Последующее потепление (атлантическое время) восстановило их прежние ареалы. Расселение происходило по речным долинам Днепра, Волги, Камы и по другим соединениям речных бассейнов, возникших при таянии ледника. Проникновение моллюсков на северо-запад Русской долины, а затем и в Ладожское озеро произошло еще в аллерёде, когда оно стало заливом Балтийского Ледникового озера. Первая волна вселения в основном представлена холодолюбивыми *Euglesa subtruncata* (Malm 1855), *E. nitida* (Jenyns 1832) и др., а также гастроподами *Anisus acronicus* (Ferussac 1807), *A. stroemi* (Westerlund 1881), *Lymnaeidae* и др. Вторая связана с бореальным временем, когда Ладожское озеро представляло собой залив Анцилового озера-моря. На это время приходится вселение как холодолюбивых, так и бореальных форм. Максимального развития достигают планорбиды. Вселяются и двустворчатые теплолюбивые *Unio* и *Anadonta*. Последнее массовое заселение моллюсками водоемов северо-запада Европы произошло в атлантическое время, когда в результате опускания юго-западной части Балтики устанавливается связь с океаном и ее воды осолоняются, превращаясь в Литториновое море. Оставшаяся пресноводная фауна вытесняется в водоемы бассейна. После этого Балтика перестает служить источником пополнения моллюсками материковых водоемов Фенноскандии. Развитие макрофитов в суббореале и в субатлантическое время делает возможным обогащение малакофауны и максимальное развитие теплолюбивых гастропод *Planorbis carinatus* (Müller 1774), *Lymnaea peregra* (O. F. Müller 1774) и др. В это время окончательно сложился современный облик этой области [Старобогатов, 1970; Петрова, Старобогатов, 1990 и др.]. В прибойных районах крупных озер и в порожистых карельских реках раковина *Lymnaea stagnalis* (Linne 1758) принимает своеобразную уховидную форму. Обширная площадь профундали с холодными водами, слабое развитие высшей водной растительности и низкая минерализация, особенно в Онежском озере, делают этот район малопривлекательным для моллюсков. Так, средняя численность бивальвий Онежского озера составляет всего 72,5 экз./м², а гастропод – 16,2 экз./м² [Рябинкин, Полякова, 2008 и др.]. В основном они заселяют литораль и побережье озер. Профундаль заселяет небольшое количество мелких холодолюбивых *N. conventus*. Этому способствует их самооплодотворение, прямое развитие, неотения, а также живорождение – вынашивание молоди

в сумках (овисаках), расположенных на полу-жабрах.

Как упоминалось, в отложениях вокруг Мги и Петрозаводска обнаружен высокоарктический морской моллюск *Yoldia (Portlandia) arctica*. Его возникновение связано с Карским морем. В межледниковое время он по краевым районам Полярного бассейна заселил Северную Атлантику, а затем и бассейн Балтийского моря, а из Баренцева и сибирских морей проник и в Белое море и даже в Каспийское, образовав там «йольдиевый комплекс» [Гурьянова, 1951]. Его остатки, найденные на территории Карелии, свидетельствуют в пользу существования Йольдиевого моря, куда он проник или из Балтийского, или из Белого моря. Но такая неопределенность не может ни доказать, ни опровергнуть идею существования Ловенового пролива.

В последнее время были зафиксированы единичные случаи нахождения в Ладожском и Онежском озерах понто-каспийской бивальвии дрейссены (*Dreissena polymorpha* (Pallas) (личное сообщение С. П. Китаева). Ее исторический ареал (в раннем голоцене) связан с эстуариями и нижним течением рек понто-каспийской области. Однако трансгрессия Черного и Каспийского морей и образование обширной гидрографической сети в верхних течениях рек Днепра, Дона и Волги в периоды таяния ледников в предпоследнем или последнем межледниковье способствовали ее расселению в восточную, центральную и, возможно, в западную Европу. Быстрое расширение ареала дрейссены связано как с ее широкой эврибионтичностью, со способностью гамет и молоди переносить опреснение, так и с развитием судоходства и образованием искусственных межбассейновых каналов. Судя по генетическим исследованиям, на Европейский Север дрейссена попала как непосредственно из бассейна Каспия, так и из Западной Европы [Махров, Болотов, 2006]. Она проникла во все подходящие по минерализации крупные водоемы (содержащие не меньше 20–28 мг/л растворенного в воде кальция) по трассе волжского каскада и волго-балтийского пути [Орлова и др., 2004]. В оккупированных водоемах дрейссена, будучи одним из наиболее активных пресноводных фильтраторов, способна произвести существенные перестройки не только в бентосных, но и в планктонных сообществах. Активное заселение ею Великих озер Европы вряд ли возможно. Этому в первую очередь препятствует их низкая минерализация.

Изучение становления фауны олигохет Онежского и Ладожского озер, да и всей Фенноскандии, связано с большими трудностями, вызванными полным отсутствием ископаемого

материала. Восстанавливать пути ее формирования приходится по косвенным данным – экологии, зоогеографии и другим характеристикам рецентных форм. Фауна олигохет Европейского Севера сравнительно молодая и сформировалась в позднеледниковое время, в течение последних 13–15 тыс. лет. Решающую роль, несомненно, играли плейстоценовые оледенения, оттеснившие олигохет далеко на юг Европы, в холодные альпийские озера и другие водоемы, где они, как и некоторые другие гидробионты, нашли себе рефугии. Потепление климата и отступление ледников привело к восстановлению прежних ареалов. Водоемы, образовавшиеся по мере отступления ледника, заселялись из нетронутых ледником гор Средней Европы и из равнин Восточной. Первыми вселенцами в крупные озера были, по-видимому, холодолюбивые стенотермы из сем. Lumbriculidae (*Lampodrilus*, *Stylodrilus*, *Rhynchelmis*). Они продвигались из высокогорных холодных водоемов Европы вслед за отступанием материкового льда. Огромное Днепровское оледенение, покрывшее север Евразии, соединило приледниковые озера Западной Сибири и Европы и сделало возможным вселение олигохет и из востока. Такими пришельцами в Ладожское озеро являются *Tubifex kessleri* Hr., *T. smirnowi* Last, *Alexandrovia onegensis* Hr., *Lampodrilus isoporus* Svetl. Основная часть фауны представлена космополитами, голарктическими и палеоарктическими видами. В Балтийском Ледниковом озере-море фауна малоцифровых червей сформировалась за счет западноевропейских и сибирских видов, перенесших ледниковую эпоху. Этот водоем послужил важной трассой расселения олигохет. Пути заселения его бассейна были крупные реки, главным образом Днепр, имевший связь с Неманом, Западной Двиной и Великой, а также Дон и Дунай. Олигохеты, попав в бассейн Балтики, могли продвинуться и далее, в водоемы Швеции и Норвегии. Таким образом, Балтийское море-озеро вместе с приледниковыми водоемами стало важнейшим центром формирования пресноводной фауны и, в частности, олигохет. По гидрографической цепи в Ладожское озеро проникли виды родов *Mesenchytraus*, *Rhynchelmis*, *Stylodrilus*, *Tricodrilus*, *Rhyacodrilus* и др. Фауна олигохет Онежского озера происходит из приледниковых озер бассейна Волги. Черви проникли в бассейн озера через водораздел рек Ковжи и Вытегры. Первыми вселились холодолюбивые и бореальные стенотермы, такие как *Nais alpina* Sperber и некоторые виды *Tatriella*, *Trichodrilus*, *Stylodrilus* и *Rhynchelmis*. Обогащение фауны шло за счет восточносибирских элементов и проходило

через цепь приледниковых озер Западной Сибири и бассейнов рек Печоры, Северной Двины и Онеги. Во время ранней ультраолиготрофной стадии развития Ладожского озера в него вселились *N. alpina*, *N. behningi*, *N. elinguis* и др., позже, в связи с развитием прибрежной растительности, и фитофильные виды из водоемов Северной и Южной Европы: *N. communis*, *Aelosoma*, *Stilaria lacustris* (L.), *Ripistes parasita* (Schmidt), *Vejdovskyella comata* (Vejd.) и др. Но основная часть олигохет проникла из бассейна Днепра. В голоцене ареал холодолюбивых видов несколько сократился, увеличилась доля элосоматид, наидид и тубифицид. Появились и теплолюбивые виды: *Potamothrix hammoniensis* (Mich.), *Aulodrilus*, *Psammoryctides* и др. В последнее время в связи с антропогенным фактором (создание Мариинской и Вышневолоцкой судоходных систем) в озера проникли понто-каспийские виды (*Potamothrix*, *Isochaetides*, *Psammoryctides*) и заняли доминирующее положение. *Psammoryctides barbatus* (Grube) и *Psammoryctides albicola* (Mich.) заселили все озерные и речные системы бассейнов Ладожского и Онежского озер. Ареал *Potamothrix moldaviensis* Vejd. и *Isochaetides michaelseni* (Last.) связан с Ладожским озером. Используя судоходные пути, дальше на север, особенно в Ладожское и Онежское озера, продвинулись *Isochaetides newaensis* (Mich.), *Potamothrix bedoti* (Pig.) и *P. hammoniensis*. Распространение в Балтийской провинции пресноводно-гляциального реликта *Lamprodrilus isoporus variabilis* Svetl. ограничено Великими озерами Европы. Ареал некоторых восточных и южных видов (*T. kessleri*, *Lampodrilus archaetus*, *R. granuensis*) также ограничен Онежским озером. С этим озером связано и обитание редкой для мировой фауны олигохеты *Stylodrilus parvus* (Hrabe et Cern.). В Онежском и в меньшей степени в Ладожском озере кроме понто-каспийской фауны олигохет встречаются элементы байкальской, охридской, среднеземноморской и других фаун [Попченко, 1983а, б, 1988, 1990; Тимм, 1987 и др.].

В связи с сильнейшим загрязнением стоками целлюлозно-бумажного комбината Кондопожской губы Онежского озера в местах вблизи выпусков стоков существовать смогли лишь *Potamothrix hoffmeisteri* Clap. и *Tubifex tubifex* (Müll.). Их численность доходит до 8200 экз./м². В Петрозаводской губе и Повенецком заливе в связи с прогрессирующей эвтрофикацией увеличилась доля *Lampodrilus hoffmeisteri* Clap., *P. hammoniensis* и *T. tubifex*.

Как хорошо известно, важнейшим фактором, обуславливающим формирование биоты, несомненно являются геологические преобра-

зования и вызванные ими климатические изменения. Именно они формируют общую флористическую и фаунистическую картины района. Для восстановления более точной геологической обстановки иногда с успехом используют не только палеонтологические данные, но и показатели строения, физиологии, экологии, зоогеографии и другие характеристики рецентных форм. Они могут или подтвердить, или опровергнуть представления геологов.

Так, плиоцен и плейстоцен Фенноскандии характеризуются сложной геологической историей, целым рядом ледниковых периодов, трансгрессий и регрессий морей, их осолонениями и опреснениями. Характер и хронология этих событий, их влияние на биоту не всегда оцениваются однозначно. В частности, такие вопросы, как существование Йольдиевого моря, наличие Ловенового пролива, соединяющего Балтийское море с Белым, связь с морем Ладожского и Онежского озер и др., все еще являются предметом оживленных дискуссий. В последнее время ряд исследователей отвергают идею существования Ловенового пролива, но не в состоянии объяснить, какими путями в Ладожское озеро проникли высокоарктические виды, например, тюлени, а в Белое море – теплолюбивые. Если отрицать существование Йольдиевого моря, то трудно понять факт нахождения на его предполагаемой территории ископаемых высокоарктических холодолюбивых моллюсков (йольдий), обитающих на больших глубинах Белого моря при постоянной отрицательной температуре.

Крайне интересны различия в строении морских реликтовых форм Ладожского и Онежского озер. В Ладожском озере они сохраняют больше общих черт со своими морскими предшественниками. Это объясняется более ранним опреснением вод Онежского озера, чем Ладожского – связь Ладожского озера с морем прекратилась на несколько тысячелетий позже, чем Онежского [Ломакина, 1952; Дятлов, 2002 и др.] – или более ранним их вселением из моря в Онежское озеро, чем в Ладожское, где они еще не успели полностью приобрести пресноводный облик. Но при обсуждении этого вопроса почему-то не учитывается факт почти в два раза большей минерализации вод Ладожского озера, чем Онежского. Возможно, именно это и способствует большему сохранению у ладожских видов сходств с морскими формами. Отсутствие тюленя в Онежском озере, вероятно, также объясняется низкой минерализацией его воды (и, что не исключено, и более бедной кормовой базой). Для успешного содержания ладожского тюленя в океанариуме необходима

более высокая минерализация воды, для чего добавляется морская соль. Возможность существования тюленя в Байкале, наверное, также связана со сравнительно высокой минерализацией его вод. Это же, вероятно, является причиной отсутствия в Онежском озере морского таракана, дафнии магна и др.

Предполагается, что Онежское и Ладожское озера лишь единожды были связаны с морем, вероятно с Мгинским, но нахождение в окрестностях Петрозаводска, даже в поверхностных слоях почвы, хорошо сохранившихся раковин морских моллюсков позволяет предположить и более поздние связи озера с морем. Пока этот вопрос, как и некоторые другие, еще не имеет однозначного решения.

Литература

- Александров Б. М. Двустворчатые моллюски озер Карелии // Фауна озер Карелии. Беспозвоночные. М.; Л.: Наука, 1965. С. 96–110.
- Берг Л. С. О распространении рыбы *Muohoscephalus quadricornis* (L.) из семейства Cottidae и о связанных с этим вопросах // Избр. труды. Т. 5. Общая биология, биогеография и палеоихтиология. М.: АН СССР, 1962. С. 160–174.
- Берг Л. С., Правдин И. Ф. Рыбы Кольского полуострова // Берг Л. С. Избр. труды. Т. 4. Ихтиология. М.; Л.: АН СССР, 1961. С. 336–356.
- Березина Н. А., Панов В. Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) в Онежское озеро // Зоол. журн. 2003. Т. 82, вып. 6. С. 731–731.
- Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск, 1959. 308 с.
- Богуцкая Н. Г., Кудерский Л. А., Насека А. М., Сподарева В. В. Пресноводные рыбы России за пределами исторических ареалов: обзор типов интродукций и инвазий // Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.; СПб.: ЗИН РАН, 2004. С. 155–171.
- Боровикова Е. А. Филогеография ряпушек *Coregonus albula* (L.) и *C. sardinella Valenciennes* европейского севера России: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 28 с.
- Боровикова Е. А., Махров А. А. Обнаружение гаплотипа митохондриальной ДНК, характерного для сибирской ряпушки (*Coregonus sardinella Valenciennes* 1848), в популяции европейской ряпушки *C. albula* (Linnaeus 1758) Водлозера (бассейн Балтийского моря) // Изв. РАН. Сер. Биологическая. 2009. № 1. С. 95–99.
- Боровикова Е. А., Махров А. А. Систематическое положение и происхождение сигов (*Coregonus*, *Coregonidae*, *Osteichthyes*) Европы. Генетический подход // Усп. соврем. биологии. 2009. Т. 129, № 1. С. 58–66.
- Виноградов Г. А. Осмотическая регуляция некоторых реликтовых ракообразных в связи с особенностями их экологии и происхождения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1973. 21 с.
- Виноградов Г. А. Осмотическая регуляция некоторых ледниковых реликтовых ракообразных в связи с особенностями их экологии и происхождения // Соленосные адаптации водных организмов. Исследование фауны морей. 1976. Т. 17 (25). С. 167–209.
- Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Тр. Карело-финского отделения ВНИОРХ. 1946. Т. 2. С. 27–139.
- Гордеев О. Н. Реликтовые ракообразные озер Карелии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 1949. 14 с.
- Гордеев О. Н. Биология и экология реликтового рачка *Pontoporeia affinis* Linolstr. в озерах Карелии // Учен. зап. Карело-Финск. ун-та. Сер. Биологическая. 1952. Т. 4, № 3. С. 98–109.
- Гордеев О. Н. Высшие ракообразные озер Карелии // Фауна озер Карелии. Беспозвоночные. М.; Л.: Наука, 1965. С. 153–172.
- Гурьянова Е. Ф. К вопросу о происхождении и развитии фауны Полярного бассейна // Изв. АН СССР. Сер. Биологическая. 1939. Вып. 5. С. 679–704.
- Гурьянова Е. Ф. Индивидуальная и возрастная изменчивость морского таракана и ее значение в эволюции рода *Mesidothea* // Тр. ЗИН АН СССР. 1946. Т. 8 (1). С. 105–146.
- Гурьянова Е. Ф. Бокоплавыв морей СССР и сопредельных стран. М.; Л.: АН СССР, 1951. 1030 с.
- Давыдова Н. Н. Диатомовая флора голоценовых отложений Ладожского озера // Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М., 1968. С. 97–102.
- Давыдова Н. Н. Комплекс диатомей в донных отложениях Онежского озера // Палеоолимология Онежского озера. Л., 1976. С. 130–158.
- Деньгина Р. С., Стальмакова Г. А. О реликтовой мизиде Ладожского озера // Биологические ресурсы Ладожского озера (зоология) Л.: Наука, 1968. С. 105–116.
- Дятлов М. А. Рыбы Ладожского озера. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2002. 281 с.
- Зенкевич Л. А. Некоторые моменты зоогеографии северного Полярного бассейна в связи с вопросом о его палеографическом прошлом // Зоол. журн. 1933. Т. 12, вып. 4. С. 17–34.
- Зенкевич Л. А. Биология морей СССР. М.: АН СССР, 1963. 739 с.
- Кауфман Б. З. Преферентное поведение беспозвоночных. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1995. 205 с.
- Кауфман Б. З. Галопреферентное поведение некоторых водных беспозвоночных // Экология. 1996. № 1–2. С. 52–57.
- Кауфман Б. З. Происхождение биоты континентальных водоемов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. 258 с.
- Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
- Квасов Д. Д. Происхождение котловин современных озер и их классификация // История озер СССР: Общие закономерности возникновения и развития озер. Л.: Наука, 1986. С. 20–27.
- Квасов Д. Д. Ладожское озеро. Развитие представлений об истории озера // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 8–11.
- Китаев С. П., Стерлигова О. П. О зоогеографии рыб пресных водоемов Финноскандии // Тр. Карельского НЦ РАН. Сер. Б. Вып. 2. Биогеография Карелии. Петрозаводск, 2001. С. 167–174.
- Кудерский Л. А. Некоторые особенности географического распространения рыб в водоемах западной части бассейна Белого моря // Материалы по зоогеографии Карелии. 1961а. Вып. 1. С. 3–7.
- Кудерский Л. А. Материалы по зоогеографии рыб внутренних водоемов Карелии // Там же. 1961б. С. 19–33.

Кудерский Л. А. Роль приледниковых водоемов в формировании ихтиофауны Северо-Запада европейской части СССР // Восьмая сессия ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера»: Тез. докл. Петрозаводск, 1969. С. 93–94.

Кудерский Л. А. О происхождении реликтовой фауны в озерах Северо-Запада европейской части СССР // Известия ГосНИОРХ. 1971. Т. 76. С. 113–124.

Кудерский Л. А. О путях проникновения реликтовой фауны в озера Балтийско-Беломорского бассейна // Там же. 1972. Т. 82. С. 111–115.

Кудерский Л. А. История Ладожского и Онежского озер по данным об ихтиофауне // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990а. С. 63–65, 106–108.

Кудерский Л. А. История Ладожского и Онежского озер по данным о фауне высших ракообразных // Там же. 1990б. С. 66–67, 108–110.

Кудерский Л. А. Акклиматизация рыб в водоемах России: состояние и пути развития // Вопр. рыб-водства. 2001. № 1 (5). С. 6–85.

Кудерский Л. А. История формирования ихтиофауны больших озер бассейна Финского залива // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер. СПб., 2003. С. 468–474.

Кудерский Л. А. Пути формирования ихтиофауны Онежского озера // Тр. Карельского НЦ РАН. Вып. 7. Биогеография Карелии. Петрозаводск, 2005. С. 128–141.

Лак Г. Ц. Диатомовая флора морских и озерных надморенных отложений в котловине Ладожского озера. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1976. 64 с.

Лак Г. Ц. Экологические особенности ископаемой диатомовой флоры северо-восточного побережья Ладожского озера. Петрозаводск, 1980. 78 с.

Ломакина Н. Б. Происхождение ледниковых реликтовых амфипод в связи с вопросом о позднеледниковом Беломорско-Балтийском соединении // Учен. зап. Карело-Финского ун-та. 1952. Т. 4, вып. 3. С. 110–127.

Махров А. А., Болотов И. Н. Пути расселения и видовая принадлежность пресноводных животных Севера Европы (обзор молекулярно-генетических исследований) // Генетика. 2006. Т. 42, № 10. С. 1319–1334.

Науумов А. Д., Бергер В. Я. Колонизация Белого моря различными видами в голоцене: естественная и антропогенная составляющая // Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.; СПб., 2004. С. 223–231.

Орлова М. И., Тирриот Т. У., Протасов А. А., Шакирова Ф. М. Основные причины сходства и различия инвазий родственных видов на примере *Dreissena polymorpha* и *D. bugensis* (Bivalvia, Dreissenidae) // Там же. 2004. С. 130–155.

Первозванский В. Я. Рыбы водоемов района Костомукшского железнорудного месторождения. Петрозаводск: Карелия, 1986. 216 с.

Первозванский В. Я. Редкие и охраняемые рыбы в Красной книге Республики Карелия // Тр. Карельского НЦ РАН. 2009. № 1. Сер. Биогеография. Вып. 8. С. 81–89.

Петрова Т. Н., Старобогатов Я. И. Ладожское озеро. История озера по данным о фауне моллюсков

// История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 67–70.

Попченко В. И. Зоогеография водных олигохет Европейского Севера СССР // Водные малощетинковые черви: Материалы 4-го всесоюз. симпоз. (Тбилиси, 5–7 окт.). Тбилиси: Мецниереба, 1983а. С. 91–95.

Попченко В. И. История озера по данным о фауне олигохет // Там же. 1983б. С. 70–72.

Попченко В. И. Водные малощетинковые черви севера Европы. Л.: Наука, 1988. 287 с.

Попченко В. И. История Ладожского и Онежского озер по данным олигохет // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 70–72, 112–113.

Решетников Ю. С. О центрах возникновения и центрах расселения в связи с распределением числа видов по ареалу на примере сиговых рыб // Актуальные проблемы современной ихтиологии (к 100-летию Г. В. Никольского). М.: КМК, 2010. С. 62–87.

Рябинкин А. В., Полякова Т. Н. Макрозообентос озера и его роль в питании рыб // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2008. С. 67–91.

Савваитова А. В. О структуре вида у рыб высоких широт (на примере голецов рода *Salvelinus* (Salmonidae, Salmoniformes)) // Современные проблемы ихтиологии. М.: Наука, 1981. С. 106–124.

Старобогатов Я. И. Фауна моллюсков и зоогеографическое районирование континентальных водоемов Земного шара. Л.: Наука, 1970. 372 с.

Тимм Т. Малощетинковые черви (Oligochaeta) водоемов Северо-Запада СССР. Таллин, 1987. 229 с.

Ярвекюльг А. А. К вопросу об арктической фауне и ее истории в Балтийском море // Океанология. 1962. Т. 2, № 2. С. 327–333.

Hogböm A. G. Über die arktische Elemente in der aral-caspischen Fauna, ein tiergeographisches Problem // Bull. Geol. Inst. Upsala. 1917. Vol. 14. S. 241–261.

Salemaa H. Polyploidy in the evolution of the glacial relict *Pontoporeia* sp. (Amphipoda, Crustacea) // Hereditas. 1984. Vol. 100. P. 56–60.

Salemaa H., Heino T. Chromosome numbers of Fennoscandian glacial relict Crustacea // Ann. Zool. Fennici. 1990. Vol. 27, N 3. P. 207–210.

Segestråle S. G. The immigration and prehistory of the glacial relicts of Eurasia and Nord America. A survey and discussion of modern views // Intern. Rev. Hydrobiol. 1962. Vol. 47. 1. P. 1–25.

Sendek D. S. The origin of sympatric form of European whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) in Lake Ladoga based on comparative genetic analysis of populations in Nord-West Russia // Ann. Zool. Fennici. 2004. Vol. 41. P. 25–39.

Väinölä R. Sibling species and phylogenetic relationships of *Mysis relicta* (Crustacea, Mysidacea) // Ann. Zool. Fennici. 1986. Vol. 23. P. 207–221.

Väinölä R. Molecular and scales for evolution of *Mysis* and *Pontoporeia* // Ann. Zool. Fennici. 1990. Vol. 27, N 3. P. 211–214.

Väinölä R., Varsio S. L. Molecular divergence and evolutionary relationships in *Pontoporeia* (Crustacea, Amphipoda) // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1986. Vol. 46. P. 705–713.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Кауфман Залман Самуилович

ведущий научный сотрудник, д. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: revzal@mail.ru
тел.: (8142) 576520; (8142) 570659

Kaufman, Zalman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: revzal@mail.ru
tel.: (8142) 576520; (8142) 570659

УДК 556.072: 556

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОХРАНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Л. А. Руховец¹, Н. Н. Филатов²

¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Работа основана на использовании трехмерных моделей гидротермодинамики и экосистемы Онежского озера для обоснования методов сохранения качества воды в озере. Расчеты выполнены при разных климатических условиях и биогенных нагрузках. Получены оценки ассимиляционного потенциала и предельных нагрузок на озеро для сохранения качества вод. Применяются также математические модели для изучения распространения загрязняющих веществ в озере.

Ключевые слова: Онежское озеро, моделирование, эвтрофирование, загрязнение, ассимиляционный потенциал.

L. A. Rukhovets, N. N. Filatov. APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO THE TASKS OF PRESERVATION OF ONEGO LAKE WATER RESOURCES

Three-dimensional models of the Lake Onego ecosystem were used to substantiate the methods of preservation of water quality in the lake. Simulations were performed at different climatic conditions and nutrient load. The spread of pollutants across the lake were studied using mathematical models. Maximum permissible loads were determined.

Key words: Lake Onego, mathematical models, eutrophication, pollution, assimilation potential.

Введение

Задачи сохранения качества водных ресурсов больших стратифицированных озер, таких как Ладожское и Онежское, и других водных объектов суши, таких как реки и небольшие озера, имеют существенные различия, поскольку время реакции крупных озер на внешние воздействия измеряется годами. Это время кратно времени условного водообмена. Для Онежского озера время условного водообмена равно 14 годам. Отсюда следует, что мероприятия по регулированию водопользования, а также сбросы загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б) в озеро могут оказывать весьма длительные по времени воздействия на экосистему озера даже после окончания

мероприятия (например, после прекращения сброса ЗВ и Б).

Задачу сохранения водных ресурсов Онежского озера можно, с определенной долей условности, разделить на две.

Первая задача связана с развитием процесса антропогенного эвтрофирования Онежского озера. В Онежском озере этот процесс в настоящее время находится в начальной стадии по сравнению с развитием такого процесса в Ладожском озере.

В Ладожском озере процесс антропогенного эвтрофирования начал развиваться после 1962 г., когда стала резко расти фосфорная нагрузка. К началу 1980-х гг. Ладожское озеро перешло из олиготрофного в мезотрофное состояние. После 1983 г. стали приниматься меры

по снижению фосфорной нагрузки. Исследования процесса антропогенного эвтрофирования Ладожского озера представлены в монографиях [Ладожское озеро..., 2002; Rukhovets, Filatov, 2010].

Процесс антропогенного эвтрофирования в Онежском озере затронул, в основном, только губы озера (Петрозаводскую и особенно Кондопожскую). В целом в центральной части озера, в Большом Онего, вода по-прежнему высокого качества [Rukhovets, Filatov, 2010].

Однако рост экономики в Северо-Западном регионе России и в Республике Карелия в частности может привести к росту биогенной нагрузки на Онежское озеро. Поэтому исследования процесса антропогенного эвтрофирования в озере являются весьма актуальными.

Вторая задача связана с загрязнением акватории Онежского озера, основным источником которого являются загрязненные воды, поступающие с речным притоком, а также сточные воды населенных пунктов, расположенных на побережье, прежде всего Петрозаводска, Кондопоги, Медвежьегорска. В принципе решить задачу снижения загрязнения вод озера можно путем прекращения сброса загрязнений. Разумеется, реальное решение этой задачи требует значительных затрат.

Здесь уместно отметить, что процесс антропогенного эвтрофирования большого стратифицированного озера, запущенный ростом биогенной нагрузки, не поддается остановке в короткие сроки даже при значительных затратах на снижение нагрузки. Более того, процесс антропогенного эвтрофирования может продолжаться даже при снижении антропогенной нагрузки до уровня, имевшего место в олиготрофный период состояния озера. Примером может служить Ладожское озеро [Руховец и др., 2010].

Отметим, что обе задачи важны для решения проблемы сохранения водных ресурсов Онежского озера. В данной статье мы рассматриваем некоторые аспекты применения математических моделей для решения задач сохранения водных ресурсов Онежского озера.

Ассимиляционный потенциал природной среды и задача сохранения водных ресурсов

Ассимиляционный потенциал (АП) природной среды – ее самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. АП природной среды можно рассматривать как часть национального богатства каждой страны [Путь России в XXI век..., 1999]. АП природной среды

России является одним из значимых факторов поддержания устойчивости всей биосферы. Одной из важнейших в проблеме сохранения АП природной среды является проблема сохранения АП крупнейших пресноводных озер.

АП представляет собой особый вид природного ресурса. В этой связи задача получения экономической оценки АП важна как сама по себе, так и в рамках общей оценки природного богатства России [Обоснование стратегий..., 2006].

Применительно к водным ресурсам АП локализован по водным объектам. Для определения экономической оценки АП необходимо предварительно получить его количественную оценку. Представляется достаточно очевидным, что количественные оценки АП неодинаковы для разных озер в силу различия физико-географических условий на их водосборных бассейнах, а также в силу различий их пространственных характеристик.

В качестве количественной оценки АП представляется естественным принять систему лимитов (по ингредиентам) на объемы сброса ЗВ и Б, соблюдение которых сохраняет устойчивость водных экосистем. Задача определения этих лимитов достаточно сложна. Она требует наличия разнообразной информации о водном объекте и использования математических моделей гидродинамики и моделей экосистемы. В этой связи задача получения оценок допустимых уровней сбросов ЗВ и Б и задача оценки АП по ингредиентам по сути совпадают. В данной статье математические модели, представленные далее, используются для определения уровня допустимой биогенной нагрузки на экосистему Онежского озера, расчета распространения загрязнений, приносимых основными реками, впадающими в озеро.

Математические модели гидротермодинамики и экосистемы

К настоящему времени для Онежского озера имеются три трехмерные модели: гидротермодинамики большого стратифицированного озера, переноса пассивной примеси и экосистемы Онежского озера.

Модель гидротермодинамики для Онежского озера была получена путем адаптации модели гидротермодинамики большого стратифицированного Ладожского озера [Astrakhantsev et al., 1998] к конкретным морфометрическим параметрам Онежского озера. В этой работе принимали участие сотрудники ИВПС КарНЦ РАН [Руховец, Филатов, 2004].

Модель переноса пассивной примеси фактически совпадает с трехмерной моделью трансформации трехмерного поля температуры. В силу специфики уравнений геофизической гидродинамики в гидростатистическом приближении расчеты распространения пассивной примеси необходимо проводить одновременно с расчетом гидротермодинамического режима водоема [Астраханцев и др., 2003].

Модель экосистемы Онежского озера [Моделирование экосистемы..., 2004] представляла собой адаптацию модели Ладожского озера, созданной В. В. Меншуткиным и О. Н. Воробьевой (в кн.: [Современное состояние..., 1987]).

С помощью этих моделей был решен ряд задач:

- воспроизведена климатическая циркуляция Онежского озера [Руховец и др., 2006];
- оценено возможное влияние на гидротермодинамический режим озера потепления климата [Филатов и др., 2003; Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010];
- оценено возможное влияние глобального потепления климата на функционирование экосистемы Онежского озера [Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010].

Как уже отмечалось, с использованием модели гидротермодинамики в работах [Руховец, Филатов, 2004; Руховец и др., 2006] построена климатическая циркуляция Онежского озера, а также еще несколько циркуляций, которые соответствуют различным сценариям возможных изменений климата на водосборе. Всего, таким образом, построено пять циркуляций Онежского озера: климатическая; теплая; теплая с повышенным притоком; теплая с пониженным притоком; холодная. Здесь названия циркуляций соответствуют использованию в расчетах данных о максимальных и минимальных среднемесячных значениях теплозапаса водного тела озера и минимальных и максимальных значениях годового притока в озеро [Rukhovets, Filatov, 2010].

Для каждой из этих пяти циркуляций было воспроизведено с помощью модели экосистемы круглогодичное функционирование экосистемы озера при различных уровнях биогенной нагрузки на водоем [Руховец и др., 2006]. В проведенных вычислительных экспериментах рассмотрены четыре варианта биогенной нагрузки.

Первый вариант соответствовал годовой нагрузке, равной 1003 т Р/год и 17 739 т N/год для периодов 1986–1987 и 1992–1997 гг. [Онежское озеро, 1999, с. 62–64]. Анализ внутригодового распределения поступления биогенов в озеро показывает, что это распределение сильно

коррелирует с внутригодовым распределением водного притока. Поэтому дополнительное поступление биогенов за счет сточных вод и атмосферных осадков в озеро в модели распределялось в соответствии с указанной связью.

Второй вариант соответствовал годовой нагрузке, имевшей место в 2001–2002 гг.: 786 т Р/год и 15 051 т N/год [Руховец и др., 2006]. При этом следует отметить, что снижение биогенной нагрузки, в основном, связано со снижением поступления биогенов с речным притоком.

Для исследования изменений в экосистеме Онежского озера в долгосрочной перспективе были рассмотрены еще третий и четвертый гипотетические варианты биогенных нагрузок. В качестве третьего варианта была взята повышенная биогенная нагрузка, равная 1500 т Р/год и 27 000 т N/год, в качестве четвертого – 2000 т Р/год и 36 000 т N/год. Эти нагрузки в 1,5 и 2 раза превышают зарегистрированные нагрузки, средние для периода 1992–1997 гг. Авторы исходили из того, что такое увеличение весьма значительно и может реализоваться, если в перспективе резко вырастет валовой региональный продукт (ВРП) и при этом сохранится современный характер экономики и сложившееся отношение к сохранению качества вод в водных объектах.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов представлены на рис. 1–3.

Анализ результатов, представленных в [Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010], позволяет сделать два вывода:

- во-первых, при сохранении биогенной нагрузки на уровне 800 т Р/год и 1500 т N/год пелагиаль озера должна сохранять свой олиготрофный статус, что позволяет принять эти величины в качестве оценок АП по сбросу фосфора и азота в озеро;

- во-вторых, полученные оценки практически не меняются при возможных изменениях климата на водосборе озера.

Полученные количественные оценки АП могут быть использованы в задачах по обоснованию ставок платежей за сброс биогенов – азота и фосфора – в акваторию озера.

Моделирование распространения загрязнений в Онежском озере

Краткая характеристика современной антропогенной нагрузки на водоем. Воспроизведение процесса загрязнения акватории озера представляется важным для решения задач сохранения и использования его водных ресурсов. Экономический рост в стране, в том числе на водосборе Онежского озера, начавшийся в

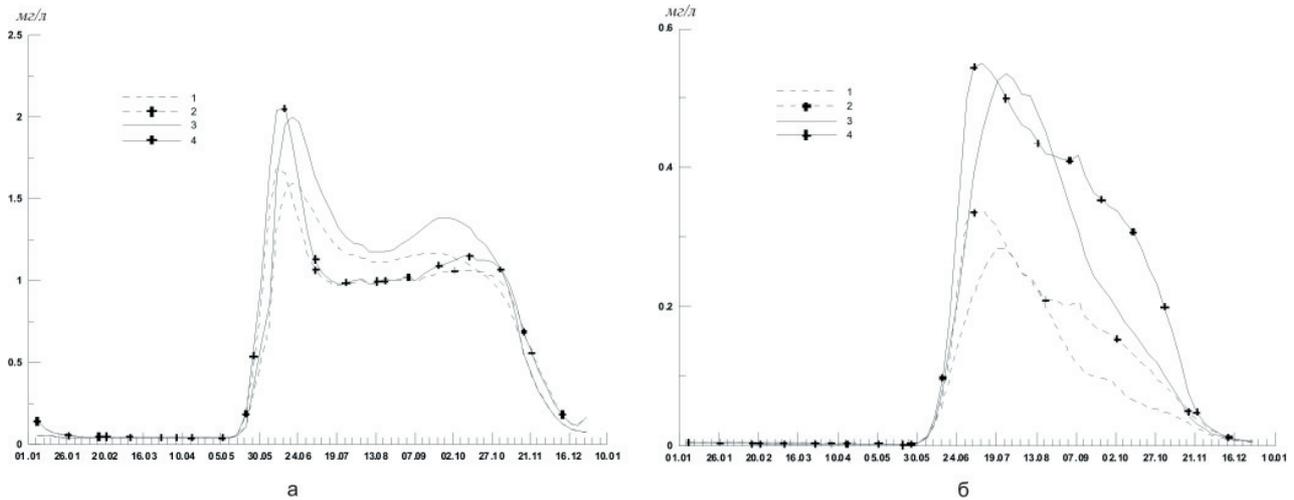


Рис. 1. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 786 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 15 051 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2); результаты моделирования при нагрузке 1003 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 17 739 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (3), теплая циркуляция (4)

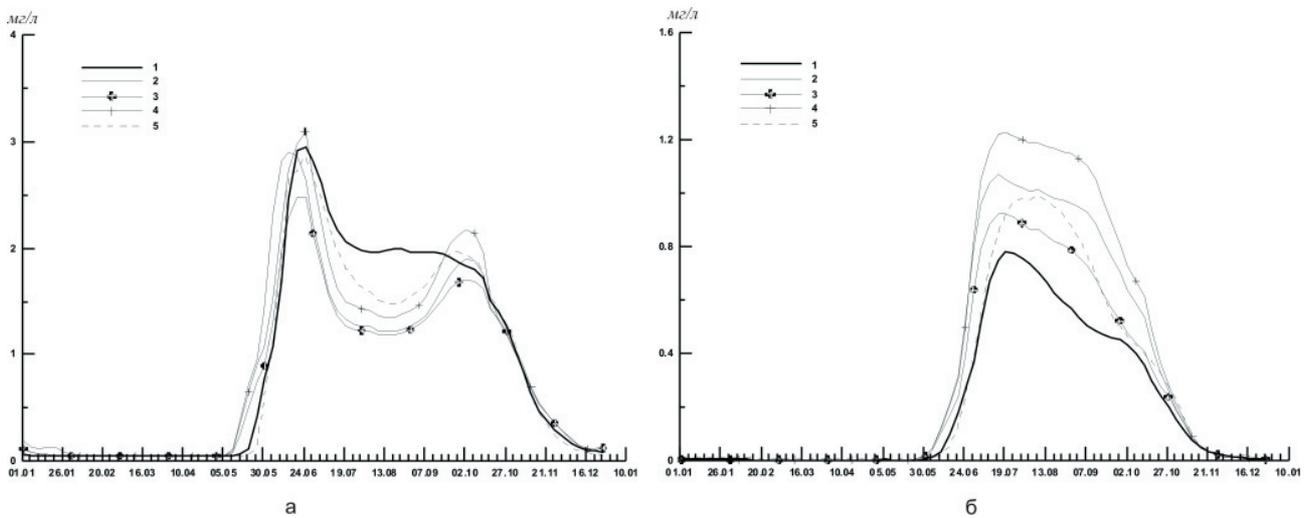


Рис. 2. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 1500 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 27 000 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2), климатическая циркуляция с повышенным притоком (3), климатическая циркуляция с пониженным притоком (4), холодная циркуляция (5)

1999 г., может со временем привести к усилению антропогенного пресса на водоем. В этой связи исследования загрязнения озера методами математического моделирования, несомненно, актуальны.

Исследования процесса распространения загрязнений Онежского озера специалистами Карельского НЦ РАН начались достаточно давно. Подробно результаты этих исследований представлены в работах сотрудников Института водных проблем Севера КарНЦ РАН [Онежское озеро, 1999].

Загрязнение озера, наряду антропогенным эвтрофированием, является одним из существенных факторов, определяющих качество воды Онежского озера – важного источни-

ка питьевого и промышленного водоснабжения. Как отмечается в [Онежское озеро, 1999; Rukhovets, Filatov, 2010], повышение концентрации биогенных элементов, в основном фосфора и отчасти азота, наблюдается только в прибрежной зоне озера, преимущественно в губах и заливах. При этом уже с начала 90-х гг. наблюдается даже снижение концентрации биогенных элементов, как следствие снижения внешней антропогенной нагрузки, связанного с экономическим спадом в период 1990–1999 гг. Так, по данным из [Онежское озеро, 1999, с. 74, табл. 3.12] концентрация $P_{\text{общ}}$ в центральной и внешней частях Петрозаводской губы в период 1990–1996 гг. заметно снизилась (во внешней части губы с 30 мкг/л в период

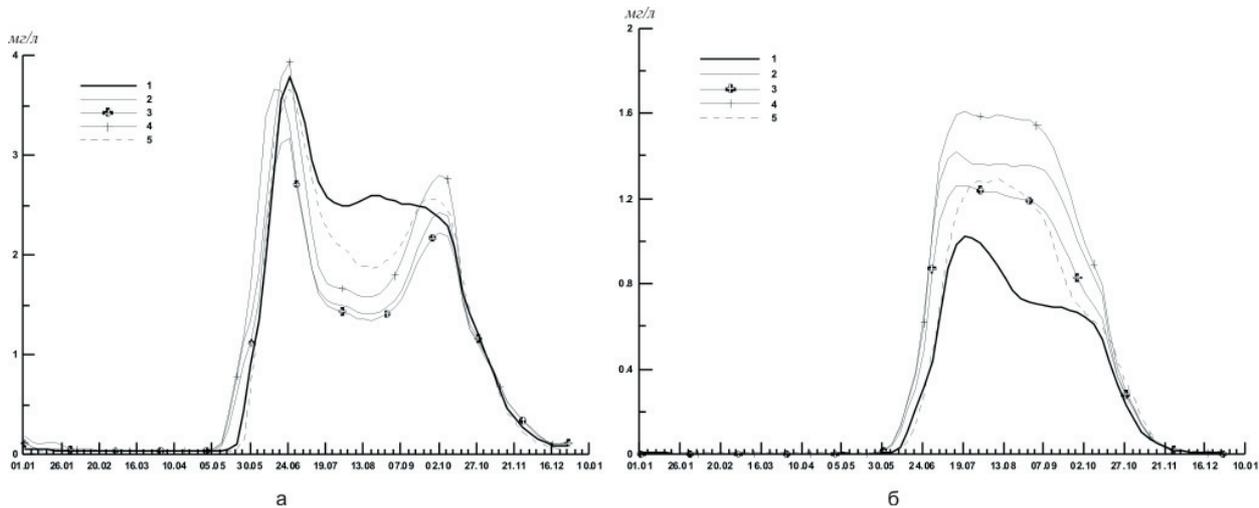


Рис. 3. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 2000 т $P_{общ}/год$ и 36 000 т $N_{общ}/год$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2), климатическая циркуляция с повышенным притоком (3), климатическая циркуляция с пониженным притоком (4), холодная циркуляция (5)

1987–1990 гг. до 17 мкг/л). Следует отметить, что основная часть озерной котловины заполнена чистыми олиготрофными водами.

Одним из наиболее значимых факторов загрязнения Онежского озера является поступление в озеро тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Pb и др.), а также таких металлов, как Mn и Al, которые также важны с точки зрения загрязнения озера. Основным источником поступления металлов в озеро являются воды, поступающие с речным притоком. Следует отметить, что как фоновые концентрации, так и концентрации, связанные с антропогенной нагрузкой, практически по всем перечисленным субстанциям не превышают ПДК. Исключение составляют вершины Петрозаводской и Кондопожской губ [Онежское озеро. Атлас, 2010]. Таким образом, картину загрязнения металлами до какой-то степени можно считать благополучной, однако постоянное воздействие малых доз также опасно для водоема [Израэль, Цыбань, 2008].

Поступление сточных вод в водоем, как правило, привязано к населенным пунктам. Объемы поступления сточных вод определяются численностью и распределением населения в прибрежной зоне озера и развитостью систем очистки сточных вод. К сожалению, КОС имеется только в Петрозаводске [Онежское озеро. Атлас, 2010].

К числу значимых загрязнений Онежского озера относится также нефтяное загрязнение. В особенности оно было существенно до 1991 г. Первые результаты моделирования нефтяного загрязнения в Петрозаводской губе с помощью созданной авторами модели представлены в [Моделирование экосистемы..., 2004]. Харак-

теризуя ситуацию с загрязнением Онежского озера в целом, следует заметить, что за исключением вершинных участков губ и заливов озера, особенно вершинных частей Петрозаводской и Кондопожской губ, качество воды остается хорошим (воды характеризуются как чистые).

Моделирование переноса загрязнений. Для проведения расчетов распространения загрязнений использовались созданные авторами трехмерные модели: модель гидротермодинамики и модель распространения пассивной примеси. Первая из этих моделей [Astrakhantsev et al., 1998] была в 2002 г. адаптирована к проведению расчетов циркуляции и температурного режима Онежского озера. С помощью этой модели была впервые воспроизведена климатическая циркуляция Онежского озера. Подробное описание климатической циркуляции приведено в препринте [Моделирование..., 2003].

Для расчета распространения загрязнений в Онежском озере авторы адаптировали созданную ранее модель распространения пассивной примеси, применявшуюся ими для Ладожского озера [Астраханцев и др., 2003]. Адаптация сводилась к согласованию модели распространения примеси с моделью гидротермодинамики водоема, с помощью которой была построена климатическая циркуляция озера.

Представим кратко математическую модель распространения пассивной примеси в водоеме. Для описания распространения гидродинамически пассивной примеси в водной среде обычно используется следующее уравнение турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \gamma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t)$$

с соответствующими краевыми и начальными условиями. Здесь $C(x, y, z, t)$ – концентрация примеси; (u, v, w) – вектор скорости движения воды, γ – коэффициент неконсервативности; v_x, v_y, v_z – коэффициенты турбулентной диффузии; $f(x, y, z, t)$ – функция, описывающая поступление (или сток) примеси.

Созданная в [Астраханцев и др., 2003] соответствующая дискретная модель представляет собой полученную методом сумматорной аппроксимации систему сеточных уравнений, аппроксимирующих краевую задачу для трехмерного уравнения переноса, в котором учтена возможность оседания примеси с постоянной вертикальной скоростью, тем самым учтена и возможность расчета неконсервативной примеси. При этом допускается поступление примеси через поверхность водоема, с речным притоком и от береговых и внутриводоемных источников.

Для новой дискретной модели распространения примеси, согласованной с моделью гидротермодинамики, справедлив точный аналог закона сохранения вещества, что использовалось для контроля счета. Новая модель имеет более высокий порядок аппроксимации, чем созданная авторами ранее аналогичная модель [Астраханцев и др., 1988].

О верификации модели заметим следующее. С вычислительной точки зрения задача о переносе примеси фактически описывается теми же дискретными уравнениями, что и задача о распространении тепла в водоеме. Тот факт, что поле температуры, его эволюция во времени воспроизведены для Онежского озера достаточно достоверно [Моделирование..., 2003], позволяет считать, что и поле концентраций примесей воспроизводится с не меньшей достоверностью. Следует отметить, что расчеты полей концентраций гидродинамически пассивной примеси необходимо проводить совместно с интегрированием гидродинамической модели. Дело в том, что при расчетах распространения примеси необходимо учитывать перемешивание, реализация которого определяется полем температуры. Поэтому при расчетах поле концентраций примеси перестраивается по алгоритму конвективного приспособления одновременно с полем температуры. Совместное интегрирование уравнений гидротермодинамики водоема и уравнения распространения примеси требует значительных временных затрат на проведение расчетов. Учитывая, что расчеты следует провести для значительного

числа субстанций, авторы пошли по пути построения так называемых функций влияния (функция влияния на каждый момент времени представляет собой трехмерное поле значений концентрации условной примеси). При моделировании было принято, что постоянно действующим источником поступления загрязнений является речной приток. При этом учитывались только четыре впадающие реки – Шуя, Суна, Водла и Вытегра. Для каждой из этих рек решалась задача о распространении условной примеси, поступающей со стоком этой реки с концентрацией 1 г/л, притом что из остальных рек эта условная примесь не поступает. В результате расчетов были построены зависящие от времени четыре сеточные функции. Их построение состояло в получении для каждой реки периодического решения путем совместного интегрирования системы уравнений гидротермодинамики водоема и уравнения распространения примеси. Построенные функции называются функциями влияния. С их помощью для каждой из субстанций, зная объемы ее поступления из каждой реки, можно получить трехмерные поля распределения каждой из субстанций и их трансформацию во времени.

Результаты расчетов функций влияния представлены на рис. 4–7 для каждой из рек. При этом на каждом из рисунков представлено распределение условной примеси на поверхности водоема для четырех моментов времени – по одному на каждый сезон. На рисунках проведены линии равной концентрации условной примеси (в г/л).

Практическое применение построенных функций влияния, очевидно, сводится к следующему. Для получения трехмерных полей концентрации определенной субстанции каждая из функций влияния умножается на фактическое значение концентрации данной субстанции в воде реки, и суммированием функций влияния получается трехмерное поле распределения данной субстанции на данный момент времени.

Заключение

Как показали результаты моделирования, сохранение олиготрофного статуса озера может быть обеспечено поддержанием поступления биогенов на уровне, не превышающем 800 т Р/год и 15 000 т N/год, и строительством комплексов очистных сооружений в городах, расположенных на побережье озера. Вычислительные эксперименты показали, что изменения

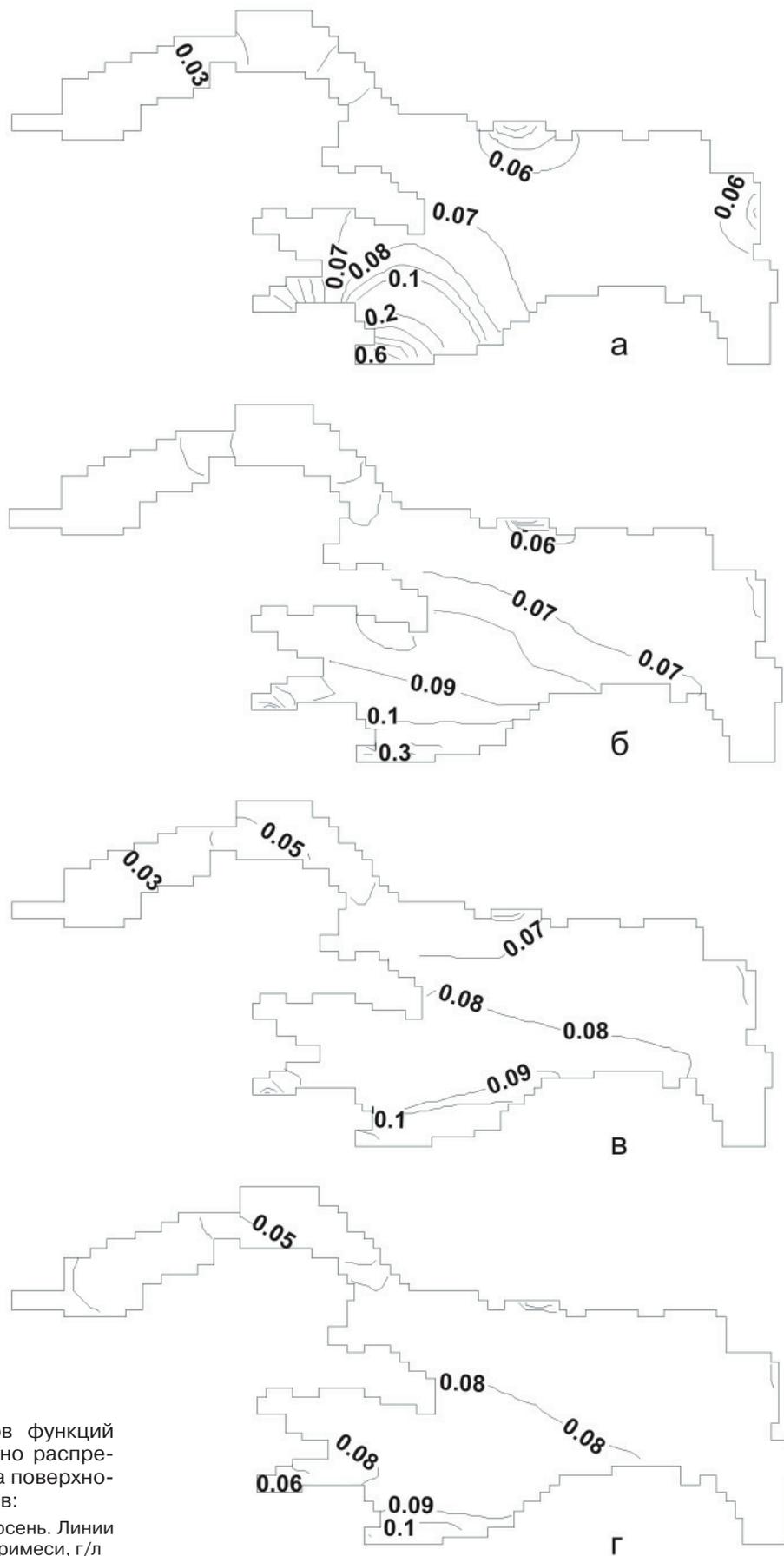


Рис. 4. Результаты расчетов функций влияния р. Шуи. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

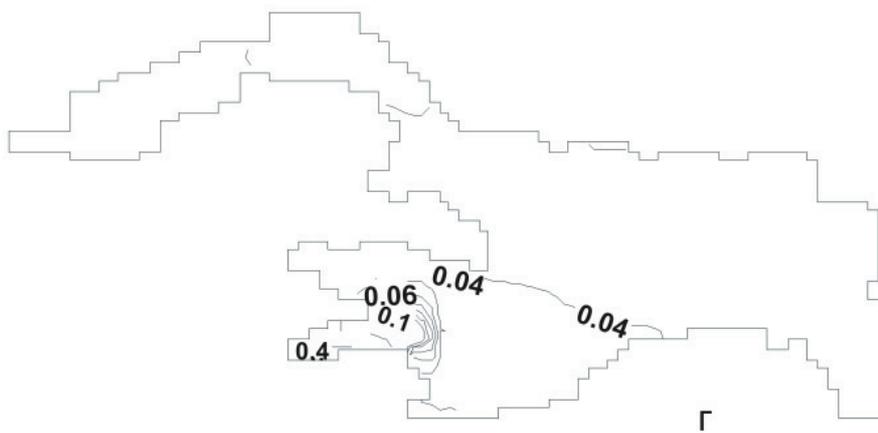
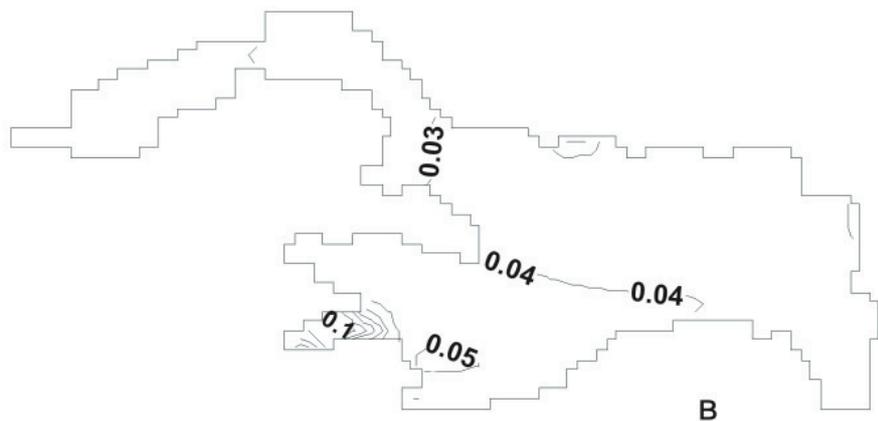
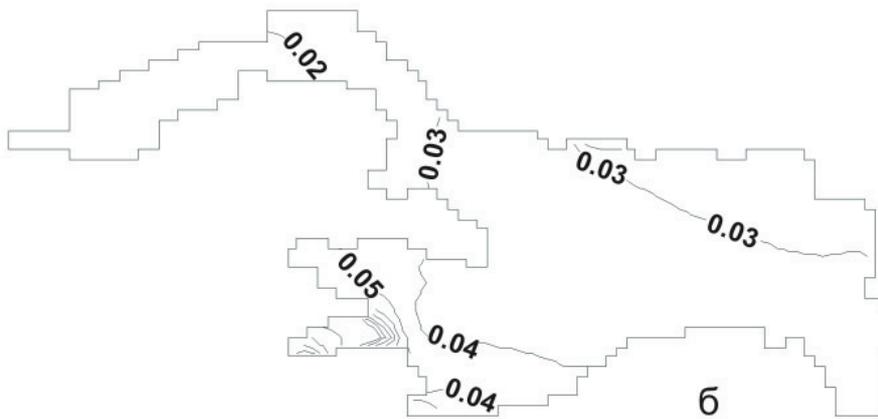
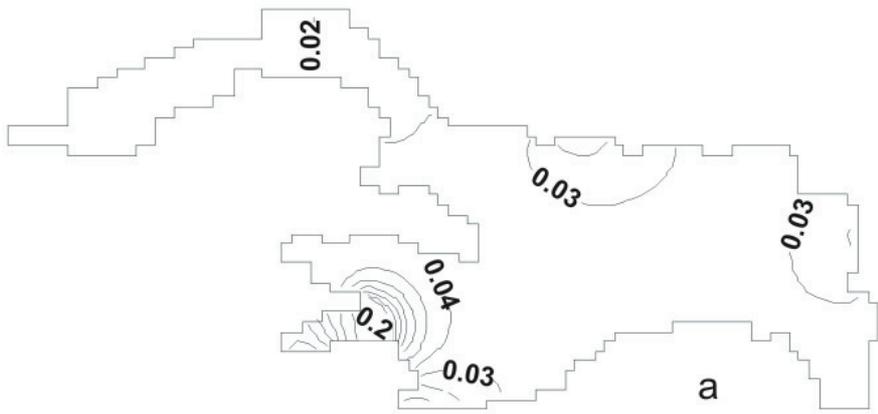


Рис. 5. Результаты расчетов функций влияния р. Суны. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

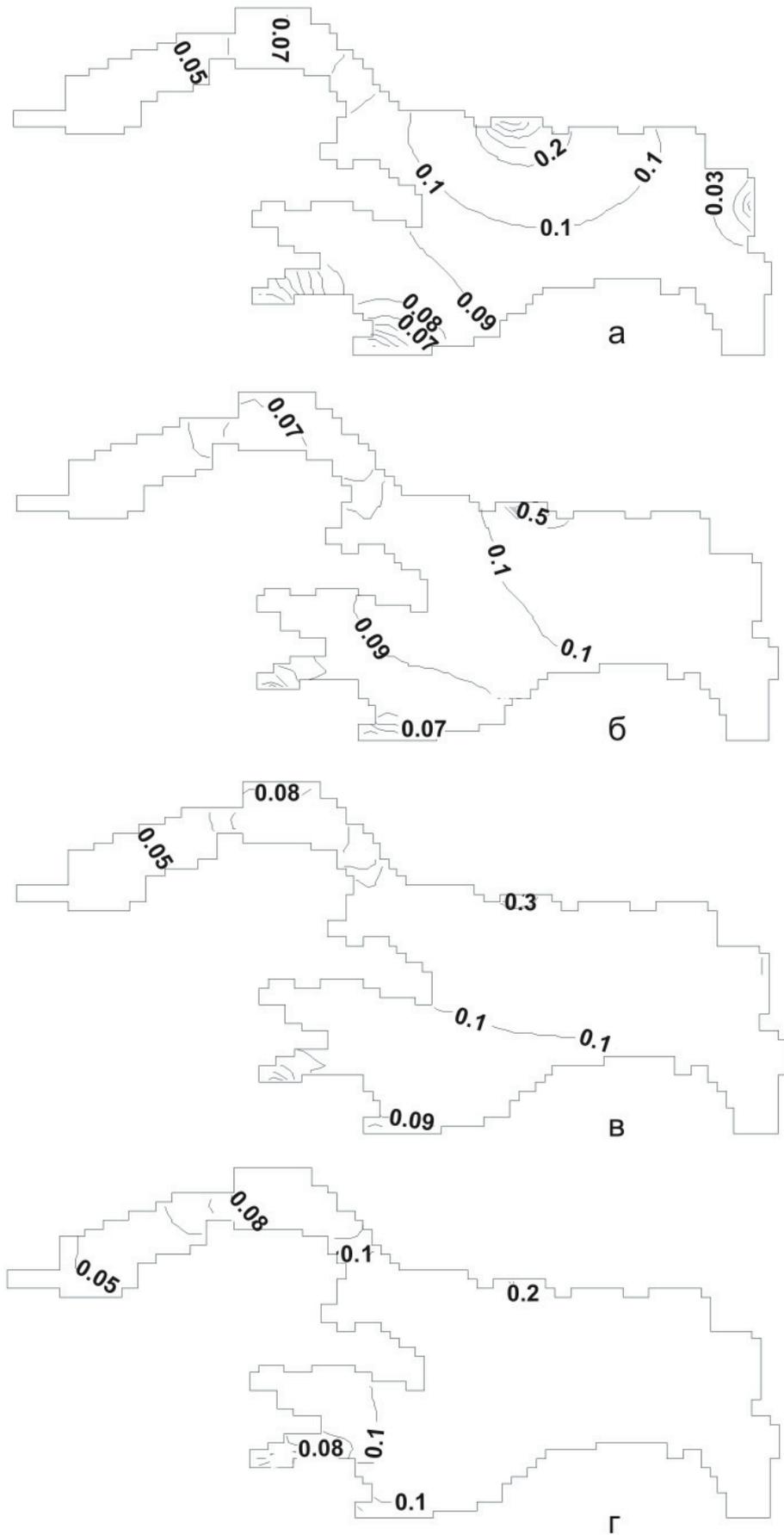


Рис. 6. Результаты расчетов функций влияния р. Водлы. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов:

а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

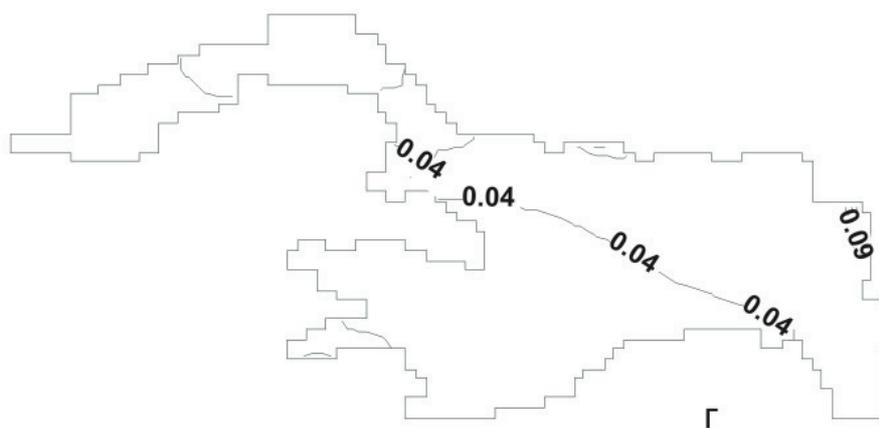
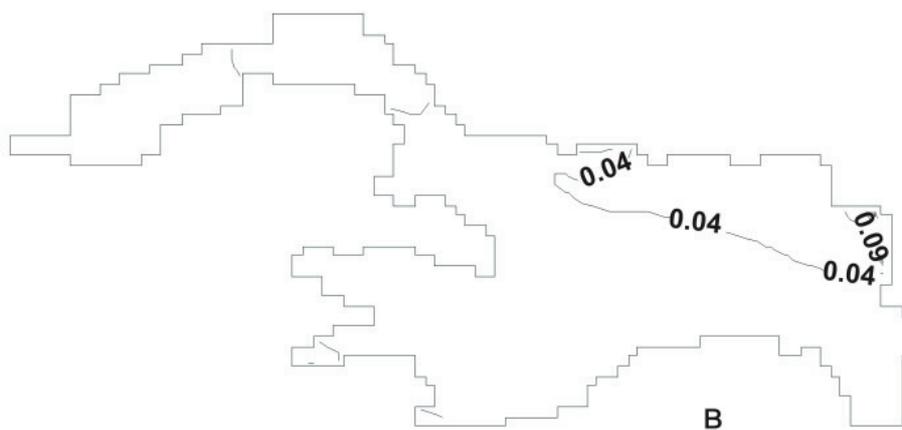
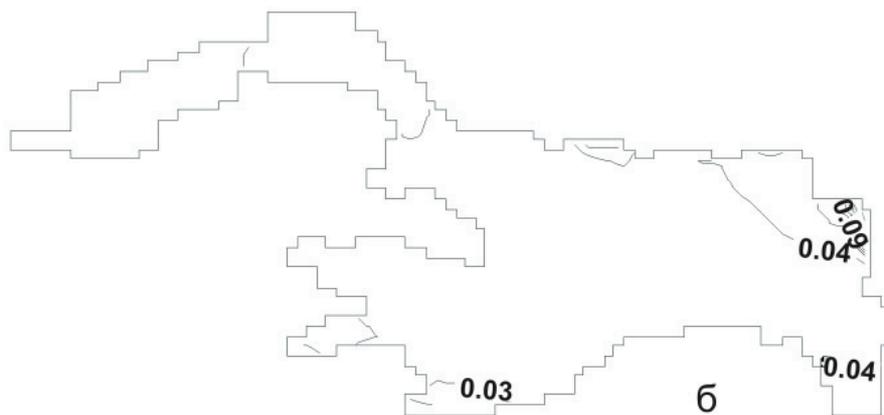
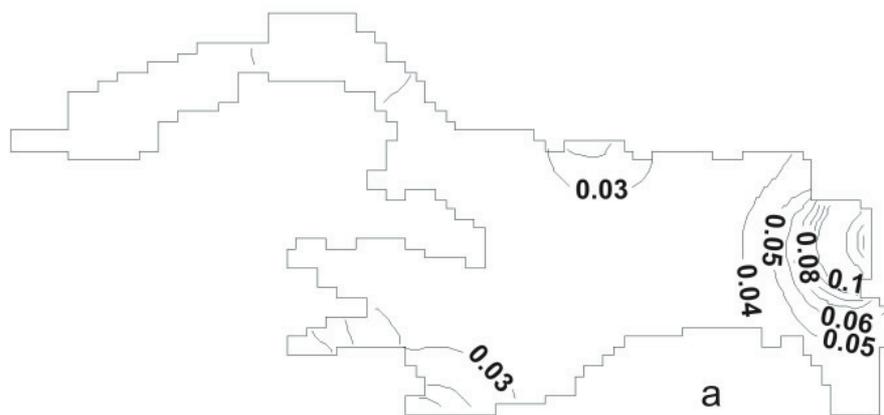


Рис. 7. Результаты расчетов функций влияния р. Вытегры. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов:

а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

в гидротермодинамическом режиме озера при возможных изменениях климата в целом незначительны. В основном изменения относятся к осеннему периоду и второй половине лета, а изменения в годовой динамике биомассы фитопланктона (основного продуцента в экосистеме Онежского озера) заметны только в осенний период и незначительны. Реакция зоопланктона на изменение температурного режима озера более заметна, чем у фитопланктона, и она имеет место в течение всего вегетационного периода.

Существенно более значимой является реакция экосистемы озера на изменения антропогенной нагрузки, особенно на рост поступления биогенов.

Для основных рек были оценены особенности распространения загрязнений озера для четырех сезонов. Адаптированные авторами модели гидротермодинамики, экосистемы озера и распространения примеси могут быть использованы для создания системы поддержки принятия решений по управлению и сохранению водных ресурсов Онежского озера.

Авторы благодарны коллегам из наших институтов: Г. П. Астраханцеву, В. В. Меншуткину, Т. Р. Мининой, В. Н. Полоскову, А. Ю. Тержевику, вместе с которыми были разработаны и внедрены математические модели для исследования экосистемы Онежского озера и распространения в нем загрязнений, а также М. С. Богдановой за подготовку рисунков. Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 10-05-00963, 10.06-00380 и программы фундаментальных исследований № 10 ОНЗ РАН.

Литература

Астраханцев Г. П., Егорова Н. Б., Руховец Л. А. Математическое моделирование распространения примеси в водоеме // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 71–79.

Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Под ред. Л. А. Руховца. СПб.: Наука, 2003. 362 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Руховец Леонид Айзикович

директор СПб ЭМИ РАН, профессор, д. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН
ул. Чайковского 1, Санкт-Петербург
эл. почта: leor@emi.nw.ru
тел.: (812) 2737953

Филатов Николай Николаевич

директор ИВПС КарНЦ РАН, член-корр. РАН
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru
тел.: (8142) 576381; +79216292222

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. 164 с.

Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева и В. Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. 327 с.

Моделирование Онежского озера для решения задач использования и сохранения его водных ресурсов / Под редакцией Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2003. 31 с.

Моделирование экосистемы Онежского озера и распространения загрязнений / Под ред. Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. (Препринт.) СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2004. 32 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007 год / Ред.: Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань. М., 2008. 164 с.

Обоснование стратегий управления водными ресурсами / Отв. ред. В. И. Данилов-Данильян. М.: Научный мир, 2006. 335 с.

Онежское озеро / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1999. 294 с.

Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 151 с.

Путь России в XXI век: стратегические проблемы и перспективы российской экономики / Рук. авт. колл. Д. С. Львов. М.: Экономика, 1999. С. 248–249.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. (ред.). Влияние потепления климата на экосистемы больших озер Северо-Запада России (Ладога и Онега). Ч. 2. (Препринт.) СПб., 2004. 40 с.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. и др. Онежское озеро сегодня и завтра: опыт математического моделирования // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 127–153.

Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой и Г. Ф. Расплетинной. Л.: Наука, 1987. 244 с.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Сало Ю. А., Тержевик А. Ю. Оценки возможных изменений климата в бассейне крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского // Влияние потепления климата на экосистемы больших озер Северо-Запада России (Ладога и Онега). Ч. 1 / Под ред. Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. (Препринт.) СПб., 2003. С. 6–22.

Astrakhansev G. P., Poloskov V. N., Rukhovets L. A. Numerical model of the Lake Ladoga: model of the climatic circulation and ecosystem model // Proceedings of workshop in Helsinki, 1998. May, N 5. 1998. P. 80–97.

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds.). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 302 p.

Rukhovets, Leonid

St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, Russian Academy of Science
1 Chaikovsky St., St. Petersburg
e-mail: leor@emi.nw.ru
tel.: (812) 2737953

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru
tel.: (8142) 576381; +79216292222

УДК 556.55: 556.5072+597.2/.5

ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ И ОЗЕРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. В. Меншуткин

Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

Предлагаются подходы к модельному описанию озерной системы с учетом гидрологических, гидробиологических и икhtiологических процессов, а также к изучению изолированной популяции окуня с учетом переменного темпа роста и изменения способов питания. Все характеристики представлены в виде лингвистических переменных. Для описания функциональных зависимостей использована элементарная логика. Такой подход позволяет использовать при построении модели словесное описание процессов без математической формализации.

Ключевые слова: логико-лингвистическое моделирование, озерные экосистемы, рыбы.

V. V. Menshutkin. LOGICAL-LINGUISTIC MODELS OF THE FISH POPULATIONS AND LAKE ECOLOGICAL SYSTEMS

We suggest approaches to model-based description of the lake system taking into account the hydrological, hydrobiological and ichthyological processes, as well as to the study of the isolated population of perch taking into account the variable growth rate and modification of feeding modes. All characteristics are presented as linguistic variables. Description of functional relationships is realized as the elementary logic function. This approach requires only verbal description without mathematical formalization.

Key words: mathematical models, lake ecosystems, fish.

Введение

Основу настоящей публикации составляют два положения. Первое – общепризнанное в лимнологии положение о целостности озера как сложной системы. Второе, гораздо менее распространенное, – это положение о том, что все количественные характеристики озера являются достаточно размытыми величинами. Последнее положение неявно учитывается при статистической обработке наблюдений с указанием доверительных интервалов. Однако когда речь идет о параметрах функциональных зависимостей, связывающих отдельные переменные, характеризующие озерную систему, то одних доверительных интервалов оказывается недостаточно. Дело в том, что такие осново-

полагающие параметры, как, например, коэффициенты турбулентной диффузии или коэффициенты смертности гидробионтов, требуют для своего определения достаточно сложных экспериментальных исследований. Использование «литературных» данных, полученных обычно совсем в иных условиях, чем в данном конкретном случае, вносит дополнительную и трудно определимую неопределенность. Высказанные соображения приводят к тому, что создание модели всей системы озера представляется затруднительным при использовании традиционных средств в виде систем дифференциальных или конечноразностных уравнений. Трудность усугубляется еще и тем, что применение потоков энергии как связующего звена всех элементов озерной системы при-

водит к необходимости оперирования величинами, отличающимися на несколько порядков. Так, энергетические потоки теплового баланса озера не сопоставимы с энергетическими потоками в биотической части озерной экосистемы, особенно если дело касается сообществ промысловых рыб.

В настоящей публикации предлагается выход из создавшегося положения при помощи применения логико-лингвистических моделей [Заде, 1976; Поспелов, 1981]. Поскольку применение моделей такого типа еще не получило в лимнологии и гидробиологии широкого распространения, то изложение ведется, начиная с простейших примеров, касающихся хорошо изученных объектов – популяций рыб.

Для читателей, незнакомых с теорией размытых множеств и логико-лингвистических моделей, поясняем, что речь идет об использовании обычных слов естественного языка (в данном случае русского) для описания переменных и их значений в компьютерных программах [Поспелов, 1981]. Такой подход почти неизбежно влечет за собой представление о том, что величины, описываемые терминами «много», «мало», «ничтожно мало», являются размытыми, для их описания приходится применять аппарат нечеткой логики [Заде, 1976].

Подавляющее большинство разработанных к настоящему времени моделей популяций рыб основано на применении математического аппарата дифференциальных или конечноразностных уравнений. Применение традиционных моделей довольно часто встречает возражения и сомнения в их правомочности [Тугубалин и др., 1999], связанные, главным образом, с нереалистичностью результатов моделирования, представляемого в виде точных чисел о количестве особей в популяции на много поколений вперед.

В первой части настоящей работы делается попытка исследования точности традиционной конечноразностной модели популяции рыб с помощью применения в ней математического аппарата размытых чисел. Неутешительные результаты проведенного анализа заставляют обратиться для построения моделей популяций рыб к технологиям искусственного интеллекта, в частности, к современной методике построения экспертных систем [Форсайт, 1987; Попов и др., 1996] и логико-лингвистических моделей [Заде, 1976; Поспелов, 1981]. Экспертные системы начинают применяться в экологических исследованиях [Salski, 1992] и, в частности, в ихтиологических исследованиях [Chen et al., 2000].

Последующие разделы работы посвящены логико-лингвистическим моделям популяций

рыб и всей озерной системы, включающей в себя как гидрологические, так и гидробиологические и ихтиологические процессы.

Модель популяции рыб с использованием размытых чисел

Все числовые величины, которые используются в традиционных моделях популяций рыб, являются величинами приближенными. Например, коэффициенты естественной смертности, определяемые обычно косвенными методами, содержат в себе существенный элемент неопределенности. То же можно сказать и о коэффициентах функций воспроизводства Риккера или Бивертон и Холта. Влияние неопределенности того или иного коэффициента на результат моделирования можно оценить при помощи анализа чувствительности, однако более целесообразно применить математический аппарат преобразования нечетких или размытых чисел [Поспелов, 1986].

Самым простым представлением нечеткого числа является указание диапазона его возможного изменения. Например, численность рыб возраста 3+ оценивается от 500 до 700 особей. Таким образом, каждая величина в модели популяции рыб описывается не одним числом, как обычно, а двумя – верхним (a) и нижним (b) пределом, а сама величина записывается как A (a, b).

Определим арифметические действия над нечеткими числами принятой формы (имеются в виду только положительные числа) [Kaufman, Gupta, 1985].

$$A(a, b) + B(c, d) = C(a+b, c+d) \quad (1)$$

$$A(a, b) - B(c, d) = C(a-b, c-d) \quad (2)$$

$$A(a, b) \cdot B(c, d) = C(\min(a \cdot b, a \cdot c, b \cdot c, b \cdot d), \max(a \cdot b, a \cdot c, b \cdot c, b \cdot d)) \quad (3)$$

$$A(a, b) / B(c, d) = C(\min(a/b, a/c, b/c, b/d), \max(a/b, a/c, b/c, b/d)) \quad (4)$$

Для иллюстрации применения аппарата нечетких чисел используем очень простую модель популяции рыбы, которая описана в руководстве по практическим занятиям для студентов по ихтиологии [Жаков, Меншуткин, 1982]. Блок-схема этой модели, выполненной на системе моделирования STELLA [Hannon, Ruth, 1997], приведена на рис. 1.

Моделируемая популяция состоит из трех возрастных групп и описывается следующей системой уравнений в конечных разностях (временной шаг модели – один год):

$$E = k \cdot N3_t \cdot (1 - M) \quad (5)$$

$$N3_{t+1} = N2_t \cdot (1 - M) \quad (6)$$

$$N2_{t+1} = N1_t \cdot (1 - M) \quad (7)$$

$$N1_{t+1} = \alpha \cdot E \cdot \exp(-\beta \cdot E), \quad (8)$$

где N_{1t} , N_{2t} и N_{3t} – численности рыб в возрасте 1+, 2+ и 3+, M – коэффициент естественной смертности, k – приведенная плодовитость, E – пополнение, M – коэффициент естественной смертности. При точных значениях параметров (например, $M = 0,3$, $k = 100$, $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,0001$) модель приходит к устойчивому стационарному состоянию, а при уменьшении естественной смертности начинает испытывать незатухающие колебания.

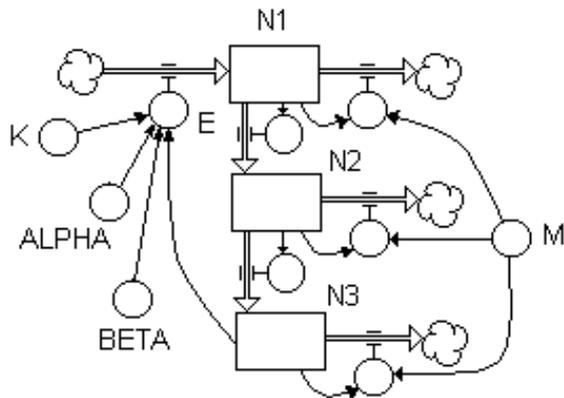


Рис. 1. Блок-схема простейшей модели популяции рыб. Обозначения системы моделирования STELLA

Внесение в рассматриваемую модель популяции рыбы даже очень небольших неопределенностей ($M(0,25, 0,35)$, $k(90, 110)$) приводит к тому, что по прошествии 3–4 лет численность и возрастная структура популяции становится полностью размытой (рис. 2).

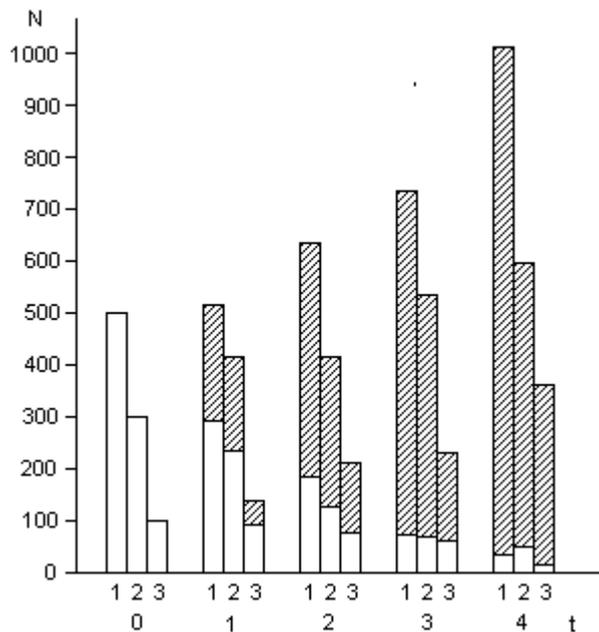


Рис. 2. Динамика возрастной структуры популяции при применении модели с нечеткой арифметикой: N – численность рыб; t – время в годах; 1 – N_1 ; 2 – N_2 ; 3 – N_3 . Заштрихована область неопределенности значений численности

Этот пример наглядно показывает, сколь иллюзорными могут оказаться результаты моделирования при помощи «точных» математических моделей. Опытные ихтиологи-практики это хорошо знают и, как правило, не рискуют давать более или менее конкретные прогнозы более чем на один-два года вперед. Выход из создавшегося положения может быть найден путем обращения к аппарату логико-лингвистического моделирования.

Модель популяции рыбы с использованием лингвистических переменных

Понятие лингвистической переменной было введено в науку Люфти Заде [1976], по образному выражению которого применение лингвистических переменных и нечеткой логики есть не что иное, как вычисления при помощи слов [Zade, 1999]. Представим модель популяции рыбы, рассмотренную в начале этой статьи, в виде совокупности операций с лингвистическими переменными. На рис. 3 изображены функции принадлежности (membership function) таких понятий, как «численность рыб очень мала» (1), «численность рыб мала» (2), «численность рыб на среднем уровне» (3), «численность рыб велика» (4), «численность рыб очень велика» (5). Аналогичным образом описываются величины естественной смертности и приведенной плодовитости.

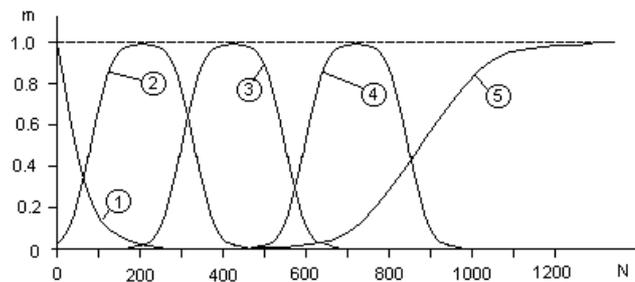


Рис. 3. Функции принадлежности (m) оценок численности рыб (N): 1 – очень низкая, 2 – низкая, 3 – средняя, 4 – высокая, 5 – очень высокая

При интерпретации формул (5)–(8) используется представление каждой функции принадлежности по 10 уровням нечеткости от 0 до 1. Для каждого уровня используются формулы, аналогичные формулам (1)–(4) для размытых чисел, заданных интервалами. В результате таких преобразований получают унимодальные функции принадлежности, однако в силу нелинейности формулы (8) они перестают быть симметричными. После получения функций принадлежности численности рыб всех возрастных

групп на следующий год, следует перейти от описания переменных в виде функций принадлежности к их словесному описанию по принятой шкале (defuzzyfication). Для этого производится сравнение полученных функций принадлежности с функциями принадлежности, которые соответствуют словесным определениям численности рыб («очень мало», «мало», «средне», «много», «очень много»). Лингвистическая переменная принимает то значение, функция принадлежности которого наиболее близка к полученной в результате преобразований по соотношениям (5)–(8). При таком подходе модель популяции рыб состоит из двух частей – базы знаний и системы логического вывода. В данном случае база знаний – это совокупность высказываний типа: «Если в данный год численность рыб возраста 0+ велика, то на следующий год численность рыб возраста 1+ при среднем значении естественной смертности окажется на среднем уровне», «Если суммарная численность выметанной икры в данном году очень велика, то на следующий год численность рыб в возрасте 0+ будет очень мала» и т. д.

Система логического вывода в данном случае осуществляет поиск в базе знаний необходимого высказывания и его приложение к конкретной ситуации. Некоторые результаты функционирования подобной модели представлены на рис. 4.

Данные исследования логико-лингвистической модели показывают, что с ее помощью можно воспроизвести все эффекты динамики численности популяции, которые могут быть получены с использованием модели, основан-

ной на решении системы дифференциальных уравнений в среде STELLA.

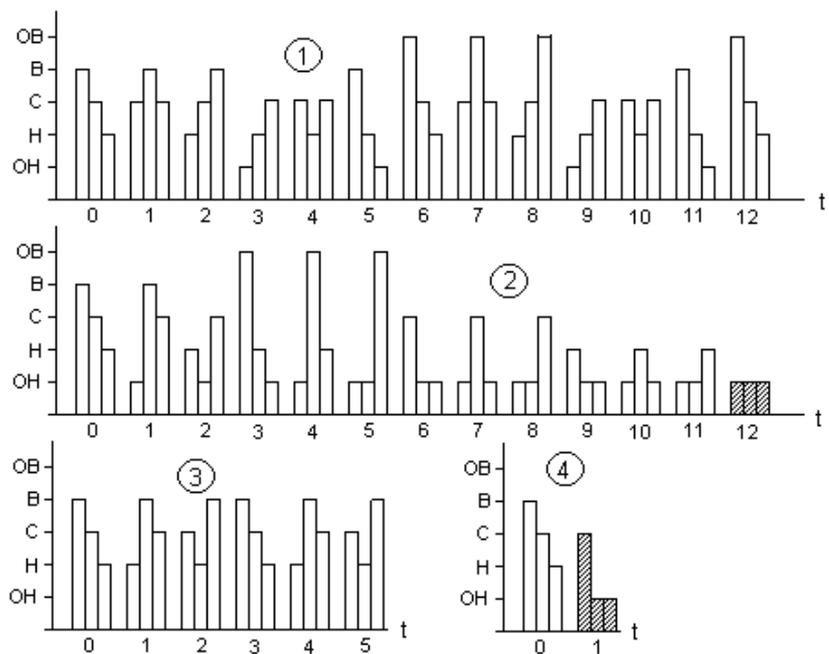
Логико-лингвистическая модель популяции окуня

Рассмотренная модель абстрактной популяции рыб, состоящая из трех возрастных групп, может служить только для иллюстративных целей и не может отразить особенности предлагаемого метода логико-лингвистического моделирования применительно к более конкретным и реалистичным объектам. Поэтому обратимся к примеру изолированной популяции окуня в озере Херя-ярви (Карельский перешеек), которая уже неоднократно использовалась для методических целей [Меншуткин, 1971].

Блок-схема модели изображена на рис. 5. В отличие от предыдущих разработок в этой модели не только численности рыб в возрастных группах (N_1 – N_6), но и темп роста окуня (W_2 – W_6), а также способ питания особей (зоопланктон, бентосом или собственной молодью) полагаются переменными величинами. Согласно рекомендациям специалистов по искусственному интеллекту [Поспелов, 1986], число градаций для описания количественных величин увеличено до семи («очень велико», «велико», «выше среднего», «средне», «ниже среднего», «низко» и «очень низко»), что более отвечает особенностям человеческого восприятия и мышления. Качественные величины, например способ питания, имеют привычные ихтиологические наименования («планктофаг», «бентофаг», «хищник»).

Рис. 4. Динамика возрастных структур модельной популяции. По оси абсцисс – время в годах, по оси ординат – численность рыб (ОВ – очень высокая, В – высокая, С – средняя, Н – низкая, ОН – очень низкая):

1 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость очень высокая (незатухающие колебания с периодом в 6 лет); 2 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость очень низкая (стационарное состояние); 3 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость низкая (незатухающие колебания с периодом в 4 года); 4 – естественная смертность высокая, приведенная плодовитость очень низкая (стационарное состояние)



Приведем примеры высказываний из базы знаний модели, которые обозначены цифрами на рис. 5.

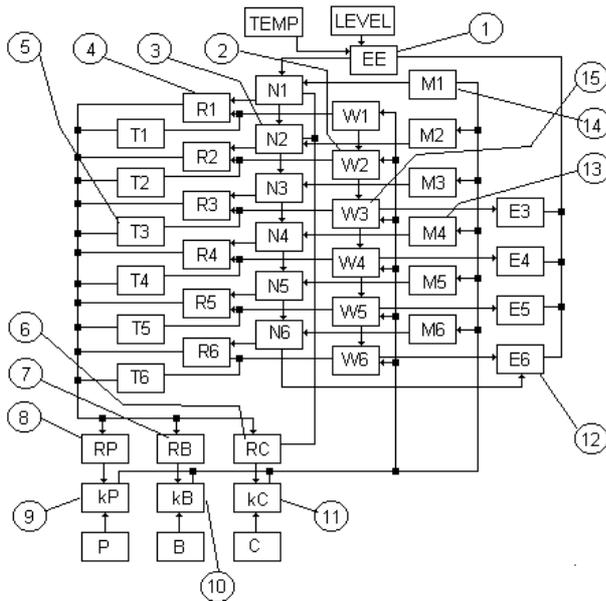


Рис. 5. Блок-схема логико-лингвистической модели популяции окуня:

N1–N6 – численность рыб в возрастных группах; W1–W6 – средняя масса тела особи в возрастных группах; R1–R6 – пищевые потребности; T1–T6 – способ питания (планктофаг, бентофаг или хищник); M1–M6 – смертность рыб в возрастных группах; E3–E6 – плодовитости самок; EE – суммарное количество выметанной икры; P – обилие зоопланктона; B – обилие бентоса; C – кормовая база хищников-каннибалов; kP – напряженность пищевых отношений при питании зоопланктоном; kB – напряженность пищевых отношений при питании бентосом; kC – напряженность отношений каннибализма; RP – суммарные пищевые потребности планктофагов; RB – суммарные пищевые потребности бентофагов; RC – суммарные пищевые потребности хищников-каннибалов. Цифрами обозначены примеры позиций базы знаний, приведенные в тексте

1 «Если суммарное количество выметанной икры (EE) было средним и количество зоопланктона (P) во время перехода личинок на внешнее питание было высоким и температура воды была средней (TEMP), то количество выживших мальков (N1) будет высоким»

2 «Если особи окуня в возрасте 1+ (N2) питаются зоопланктоном (T2) и биомасса зоопланктона в озере низка (P), то темп роста особей (W1) будет низок»

3 «Если численность особей окуня в возрасте 1+ (N2) была высокой и смертность в результате каннибализма особей старших возрастных групп была очень высокой (M2), то к концу года численность годовиков станет низкой»

4 «Если численность особей возраста 1+ (N2) была высокой и исходная масса тела особей (W2) также была высокой, и температура воды в озере (TEMP) была выше средней, то пищевые потребности этой возрастной группы (R2) оцениваются как очень высокие»

5 «Если масса тела особи в возрасте 2+ (W3) была низкой или очень низкой, то особи сохраняли питание зоопланктоном (T3), если масса тела была ниже средней, средней, выше средней или высокой, то особи питались бентосом, и только в случае очень высокой массы тела они переходили на хищное питание»

6 «Суммарные пищевые потребности хищников (RC) очень велики тогда и только тогда, когда на хищное питание перешло не менее трех старших возрастных групп окуня, причем их пищевые потребности оцениваются как высокие или очень высокие»

7 «Суммарные пищевые потребности бентофагов (RB) низки только в тех случаях, когда у всех возрастных групп окуня, питающихся бентосом, пищевые потребности (R1–R6) низки или у половины этих групп они очень низки, а у другой половины – низки или ниже среднего»

8 «Суммарные пищевые потребности планктофагов (RP) находятся на среднем уровне, если пищевые потребности всех возрастных групп в популяции окуня (R1–R6) оцениваются как средние или не больше чем для одной группы такая оценка принимает значение ниже среднего или выше среднего»

9 «Напряженность трофических отношений между популяцией окуня и зоопланктоном (kP) очень велика в том и только в том случае, когда суммарные пищевые потребности планктофагов очень велики, а биомасса зоопланктона очень мала»

10 «Напряженность трофических отношений между популяцией окуня и бентосом (kB) находится на среднем уровне, если суммарные пищевые потребности бентофагов (SB) и биомасса бентоса (B) находятся на среднем уровне или потребности бентофагов и биомасса бентоса оцениваются как ниже среднего, низкая или выше среднего или высокая одновременно»

11 «Напряженность трофических отношений между хищными окунями старших возрастных групп и молодь (kC) является высокой в том случае, когда пищевые потребности каннибалов велики или выше среднего, а ихтиомасса молоди ниже среднего или мала. Другая возможность подобной оценки возникает тогда, когда потребности каннибалов находятся на среднем уровне, но ихтиомасса молоди низка или очень низка»

12 «Плодовитость самок в возрасте 5+ (E6) высока, если масса их тела (W6) также высока»

13 «Естественная смертность окуней в возрасте 3+ (M4) выше средней, если особи этой группы являются планктофагами и напряженность пищевых отношений планктофагов средняя или выше средней, в случае если окуни этой

группы – бентофаги, то необходимо, чтобы напряженность пищевых отношений бентофагов оценивалась как средняя или выше средней, аналогичное требование и в случае хищного питания»

14 «Естественная смертность сеголетков окуня (M1) высока, если или напряженность отношений каннибализма (kC) велика, или напряженность при питании зоопланктоном (kP) высока. Возможен вариант при одновременной средней или выше средней напряженности каннибализма и питания зоопланктоном»

15 «Масса тела окуней в возрасте 2+ (W3) ниже средней в тех случаях, когда в прошлом году масса тела окуней в возрасте 1+ (W2) была средней и напряженность пищевых отношений выше средней или высокой или при средней исходной массе тела напряженность пищевых отношений была выше среднего или высокой. Другой вариант достижения массы тела ниже среднего связан с высокой исходной массой тела и очень высокой напряженностью пищевых отношений»

Всего в базе знаний модели популяции окуня дано 882 высказывания, подобных приведенным. Записаны эти высказывания в символической форме, а не на естественном языке, что сокращает объем памяти и упрощает работу с базой. Это, однако, никак не влияет на существо дела, поскольку между словесной и символической формой существует взаимно однозначное соответствие.

Функционирование модели заключается в последовательном поиске в базе знаний нужных правил, которые привели бы от оценки состояния популяции в данный год (N1–N6 и W1–W6) к оценкам для следующего года при учете внешних воздействий в виде температуры (TEMP), условий на нерестилищах (LEVEL), биомассы зоопланктона (P) и бентоса (B). Первоначально определяется трофический статус особей всех возрастных групп, кроме первой, особи которой во всех случаях питаются зоопланктоном. Далее следует поиск тех правил в базе знаний, при помощи которых можно определить пищевые потребности и напряженность трофических отношений. По известным оценкам напряженности трофических отношений производится поиск тех правил, которые относятся к естественной смертности (включая каннибализм) и темпам роста.

Процесс воспроизводства представлен в модели правилами, связывающими плодовитость самок с массой их тела. Соотношение полов полагается в модели постоянным. Выживание икринок и молоди оценивается по правилам, учитывающим не только суммарное ко-

личество выметанных икринок, но и условия на нерестилищах (возможность гибели кладок при падении уровня озера), ситуации с наличием достаточного количества корма для личинок и температуру воды. Годовой цикл завершается переносом данных о состоянии каждой возрастной группы (кроме последней) в раздел данных о следующей возрастной группе.

На рис. 6 представлен пример функционирования рассматриваемой модели популяции окуня. Возникновение периодических незатухающих колебаний возрастной структуры популяции под воздействием каннибализма является свидетельством того, что созданная логико-лингвистическая модель не входит в противоречие с исследованными ранее моделями того же природного объекта, но с использованием балансового подхода и аппарата уравнений в конечных разностях [Меншуткин, 1971].

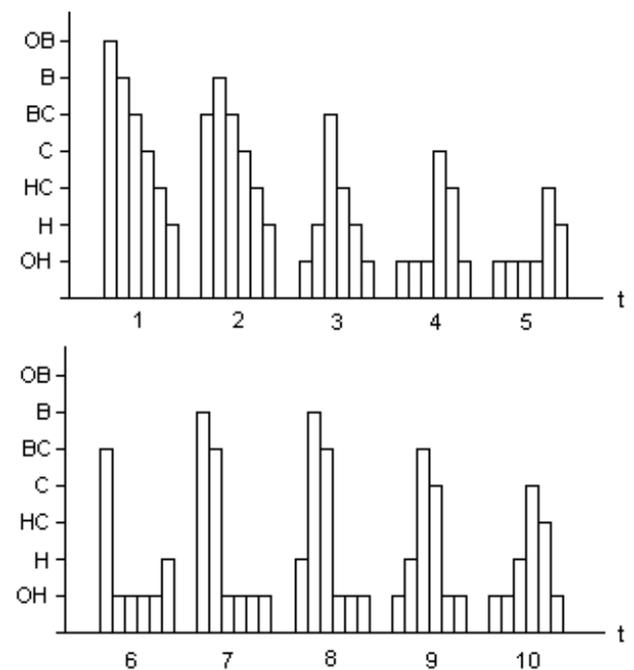


Рис. 6. Динамика возрастной структуры популяции окуня. Численности рыб в возрастных группах даны в виде качественных оценок (OB – очень высокая, B – высокая, BC – выше средней, C – средняя, HC – ниже средней, H – низкая, OH – очень низкая)

При снижении интенсивности каннибализма периодические колебания затухают, и популяция приходит к стационарному состоянию.

Логико-лингвистическая модель экологической системы озера

От модели изолированной популяции рыб естественно перейти к модели озерной экологической системы. В основу предлагаемой модели положены общие закономерности,

полученные для озер Карелии при исследовании экспертной системы, созданной по характеристикам 100 озер [Меншуткин и др., 2009]. Шкалированные величины в данном случае заменяются лингвистическими переменными. Например, биомасса бентоса оценивается как «очень низкая» при ее значениях от 0 до $2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «низкая» соответствует значениям от 2 до $5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «ниже средней» – от 5 до $15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «средняя» – от 15 до $30 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «выше средней» – от 30 до $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «высокая» – от 50 до $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «очень высокая» – выше $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. Операция перехода к нечеткой переменной («фазификация» по: Борисов и др., 2007) осуществляется путем приписывания лингвистическим переменным определенных значений функции принадлежности, которые приводятся в табл. 1.

Связи между переменными (не корреляционные, как при построении экспертной системы, а причинно-следственные) описываются при помощи операций нечеткой логики [Леоненков, 2003]. В данном случае применялись операции нечеткого отрицания, дизъюнкции и конъюнкции. Например, при описании связи первичной продукции фитопланктона с освещенностью и концентрацией биогенов в воде применялась функция конъюнкции, поскольку она соответствует закону максимума Либиха. Для имитации одновременного действия на популяцию рыб естественной и промысловой смертности целесообразно использование функции дизъюнкции как аналога формулы вероятности наступления одного из двух несовместимых событий (действительно, одновременно попасть в сеть и быть съеденной хищником не представляется возможным).

После проведения всех логических операций с величинами, характеризующимися значениями функции принадлежности, наступает фаза обратного перехода от нечетких величин к лингвистическим переменным (так называемая «дефазификация»). Происходит это согласно данным табл. 1.

Блок-схема модели озера представлена на рис. 7.

Согласно классическим лимнологическим представлениям [Богословский, 1960], в сезонном цикле динамики озера выделяются следующие периоды: ледостав, весенняя циркуляция, летняя стагнация (с выделением времени

нагрева и охлаждения) и осенняя циркуляция. Для каждого временного периода (кроме периода ледостава) оцениваются составляющие теплового потока на границе между водой и атмосферой. Полагается, что радиационный баланс (QR) определяется исходя из значения балла облачности (CA). Заметим, что для определения составляющих теплового баланса озера существуют достаточно обоснованные количественные зависимости [например, Верболов и др., 1965], однако в данном случае важна только тенденция для сохранения единообразия с теми зависимостями, для которых таких количественных зависимостей не установлено.

Приведем примеры из базы знаний модели с использованием обозначений переменных на рис. 7.

1. Время разрушения ледяного покрова (A1) наступает тем позже, чем ниже температура воздуха в зимний период (TA1) и чем меньше скорость ветра в период, предшествующий вскрытию озера (WA1).

2. Коэффициент турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы над озером в начальный период летней стагнации (K3) тем больше, чем выше скорость ветра в этот период (WA3) и температура воздуха (TA3). Вернее было бы учитывать разность температур воды и воздуха, но температура поверхности воды изменяется в меньших пределах, чем температура воздуха.

3. При определении теплового баланса в период охлаждения во время летней стагнации (Q4) учитывается, что турбулентный поток тепла (QT4) направлен от воды в атмосферу, в противоположность тому, что имело место в предыдущий период. Радиационный баланс (QR4) и затраты тепла на испарение (QD4) сохраняют свой знак.

4. Концентрация биогенов (в основном минерального фосфора, растворенного в воде) в период весенней циркуляции (B2) определяется концентрациями биогенов в зимний период (B1) и поступлением с водосбора (BA2).

5. Первичная продукция фитопланктона в период весенней циркуляции (P2) определяется концентрацией биогенов (B2) и интенсивностью солнечной радиации, проникающей в воду. Последняя величина полагается обратной среднему баллу облачности в этот период (CA2).

Таблица 1. Соотношение шкалированных значений, лингвистических переменных и функции принадлежности

Шкала	1	2	3	4	5	6	7
Лингвистическая переменная	«очень низкая»	«низкая»	«ниже средней»	«средняя»	«выше средней»	«высокая»	«очень высокая»
Значение функции принадлежности	0.0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0

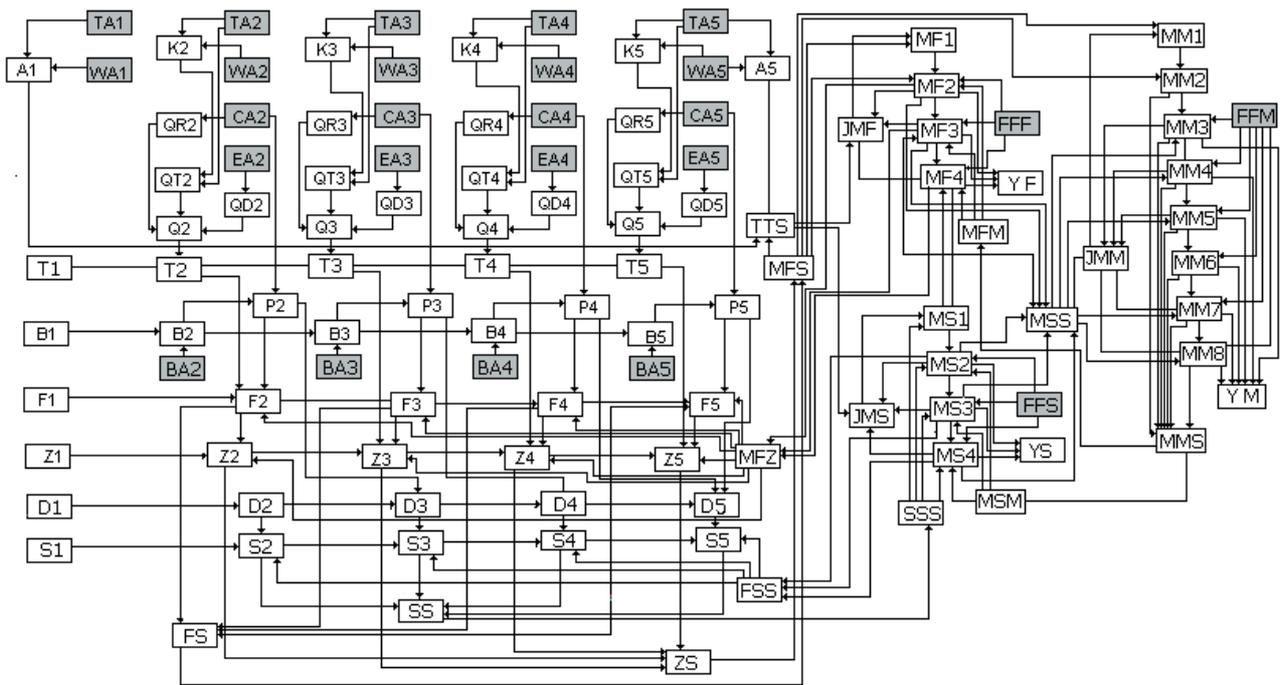


Рис. 7. Блок-схема логико-лингвистической модели озера. Внешние воздействия на водоем (на схеме отмечены серым цветом):

TA1–TA5 – температура воздуха; WA1–WA5 – скорость ветра; CA1–CA5 – облачность; EA2–EA5 – влажность воздуха; BA2–BA5 – поступление биогенов с водосбора озера; FFF, FFS, FFM – интенсивности промысла рыб-планктофагов, рыб-бентофагов и хищных рыб. Промежуточные переменные: K2–K5 – коэффициент турбулентной диффузии на границе «вода – воздух»; QR2–QR5 – радиационный баланс; QT2–QT5 – турбулентный поток тепла между поверхностью озера и атмосферой; QE2–QE5 – затраты тепла на испарение; Q2–Q5 – тепловой баланс озера; T1–T5 – температура поверхностных слоев воды; B1–B5 – концентрация растворенных биогенов в воде озера; P2–P5 – интенсивность развития фитопланктона (первичная продукция); F1–F5 – биомасса зоопланктонных фильтраторов; Z1–Z5 – биомасса хищного зоопланктона; S1–S5 – биомасса бентоса; D1–D5 – концентрация в воде мертвого органического вещества (детрита); TTS – среднегодовая температура воды; FS – годовая продукция планктонных фильтраторов; ZS – годовая продукция хищного зоопланктона; SS – годовая продукция бентоса; MF1–MF4 – биомассы возрастных групп рыб-планктофагов; JMF – воспроизводство рыб-планктофагов; JMS – воспроизводство рыб-бентофагов; SSS – иктиомасса рыб-бентофагов; MM1–MM8 – биомассы возрастных групп хищных рыб; JMM – воспроизводство хищных рыб; MSS – YF – вылов рыб-планктофагов, YS – вылов рыб-бентофагов, YM – вылов хищных рыб

6. Развитие зоопланктонных фильтраторов в период летней стагнации (F3) определяется, с одной стороны, их биомассой в предыдущий период (F2) и обилием корма в виде фитопланктона (P3), но, с другой стороны, воздействием потребителей в виде рыб-планктофагов (MFZ) и хищного зоопланктона. Кроме этого, на развитие фильтраторов оказывает влияние температура воды (T3).

7. Развитие хищного зоопланктона в период летней стагнации (Z3) определяется кормовой базой в виде зоопланктонных фильтраторов (F3), температурой воды (T3) и давлением со стороны рыб-планктофагов (MFZ).

8. Биомасса бентоса (S3) зависит от поступления мертвого органического вещества – детрита (D3) и воздействия со стороны рыб-бентофагов (FSS).

9. Иктиомасса рыб-планктофагов возраста 2+ (MF3) определяется иктиомассой тех же рыб возраста 1+ в предыдущем году (MF2), а также воздействием со стороны хищных рыб (MSS) и промысла (FFF). Кроме этого, учитываются кормовые условия (MFS).

10. Воспроизводство рыб-планктофагов (JMF) зависит от величины нерестового стада (MF2, MF3, MF4) и температурных условий в водоеме (TTS).

11. Иктиомасса хищных рыб возраста 4+ (MM5) определяется иктиомассой тех же рыб возраста 3+ в предыдущем году (MM4), а также воздействием со стороны промысла (FFM). Кроме этого, учитываются кормовые условия (MSS).

12. Величина вылова хищных рыб (YM) зависит от иктиомассы хищных рыб (MM3, MM4, MM5, MM6, MM7, MM8) и интенсивности промысла (FFM).

В табл. 2 представлены результаты исследования реакции модели озерной системы на изменение входных переменных. Резкое увеличение температуры воздуха (TA) приводит не только к повышению температуры воды, но и к росту биомассы планктона и бентоса. Через 2–3 года после резкого потепления увеличивается и иктиомасса рыб. Увеличение скорости ветра (WA) ведет к аналогичным последствиям, но в меньшем размере. Снижение среднего балла облачности над озером (CA) и, как следствие,

увеличение инсоляции приводит к незначительному снижению температуры воды (за счет усиления длинноволнового излучения с поверхности озера в атмосферу). При этом биомасса планктона немного повышается, а биомасса бентоса немного снижается. Ихтиомасса рыб также претерпевает незначительные изменения, причем у рыб-планктофагов она растет, а у бентофагов и хищных рыб – сокращается.

Существенное повышение поступления биогенов с водосбора в озеро (BA) не приводит к изменению температуры воды, зато биомассы планктона и бентоса, а за ними и ихтиомассы рыб возрастают. Усиление промысла рыб-планктофагов (FFF) ведет к росту биомассы планктона при незначительном сокращении биомассы бентоса. Ихтиомасса рыб-планктофагов резко сокращается, а ихтиомасса рыб-бентофагов немного повышается, при этом ихтиомасса хищных рыб становится ниже средней. Усиление промыслового воздействия на рыб-бентофагов (FSS) приводит к обратному эффекту: биомасса бентоса растет, а зоопланктона – сокращается, но в отличие от предыдущего примера ихтиомасса хищных рыб принимает значение «выше среднего». Усиление промысла хищных рыб (FFM) ведет к небольшому сокращению биомасс планктона и бентоса. В случае усиленного промыслового воздействия на всех рыб биомасса планктона и бентоса существенно возрастает. При сокращении промыслового воздействия больше всего возрастает ихтиомасса хищных рыб.

Обсуждение

Особенность предложенного метода логико-лингвистического моделирования популяций рыб заключается в том, что размытость и неопределенность состояния популяции заложена в

них изначально при словесной формулировке численностей рыб в возрастных группах и темпе их роста. Поэтому для моделей такого типа несущественно то лавинообразное нарастание неопределенности, которое было продемонстрировано в начале этой статьи на примере модели с использованием арифметики нечетких чисел.

Другая особенность заключается в полном отсутствии каких-либо математических формул при описании модели. Для практического применения это существенно, хотя достигается это свойство очень дорогой ценой создания громоздкой базы знаний, состоящей, даже для не слишком сложного примера, из сотен высказываний. Анализ того, как делаются реальные и очень ответственные промысловые прогнозы (например, опыт работы советско-японской рыболовной комиссии (СЯРК), экспертом которой некогда был автор настоящей статьи), показывает, что исходный материал и алгоритм такого прогноза (во всяком случае для дальневосточных лососей) строился вовсе не на основании моделей, а на основании прецедентов и знаний специалистов, которые имели первоначально вербальную форму [Меншуткин, 1969]. Модели создавались исходя из высказываний ихтиологов с большим практическим опытом (например, Ф. В. Крогиус [1961]) и служили, скорее, средством компактного обобщения этих высказываний, а не средством практического прогнозирования. Применение логико-лингвистических моделей позволяет использовать опыт практиков-ихтиологов в первоизданном виде со всеми нюансами и оттенками, которые обычно пропадают при моделировании в виде математических уравнений.

В практике ихтиологических исследований обращение к аппарату искусственного интеллекта становится обычным явлением [Saila

Таблица 2. Результаты воздействия входных переменных на состояние озерной системы

Входная переменная	Значение переменной	Величины, характеризующие состояние озерной системы					
		Температура воды (TTS)	Биомасса планктона (MFZ)	Биомасса бентоса (SS)	Ихтиомасса рыб-планктофагов (MFM)	Ихтиомасса рыб-бентофагов (MSS)	Ихтиомасса хищных рыб (MMS)
Температура воздуха (TA)	ОВ	В	В	В	ВС	ВС	ВС
Скорость ветра (WA)	ОВ	ВС	ВС	ВС	ВС	ВС	ВС
Облачность (CA)	ОН	НС	ВС	НС	ВС	НС	НС
Поступление биогенов (BA)	В	С	В	В	ВС	ВС	ВС
Промысел рыб-планктофагов (FFF)	В	С	В	НС	ОН	В	НС
Промысел рыб-бентофагов (FSS)	В	С	НС	В	ВС	ОН	ВС
Промысел хищных рыб (FFM)	В	С	НС	НС	В	В	ОН
Промысел всех рыб	В	С	В	В	ОН	ОН	ОН

Примечание. Обозначение состояний лингвистических переменных: ОН – очень низкое, Н – низкое, НС – ниже среднего, С – среднее, ВС – выше среднего, В – высокое, ОВ – очень высокое.

et al., 1997; Robb, Peterman, 1998; Mackinson, 2000], но до систематического его применения еще далеко. В области моделирования экологических систем подобные методы применяются гораздо шире [Lembach, 1994; Droesen, 1996; Keller, Dungan, 1999]. Особенно ценным представляется опыт чешских исследователей [Sterbacek et al., 1990], которые сумели соединить модель, построенную на балансовом принципе, с экспертной системой для оценки параметров этой модели и результатов моделирования. Детали реализации экспертной части гибридной модели могут быть самыми различными [Tuma et al., 1996] – от двужанной логики до нейронных сетей или аппарата размытых множеств (fuzzy sets).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 08-05-756.

Литература

- Богословский Б. Б. Озероведение. М.: МГУ, 1960. 336 с.
- Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия. Телеком, 2007. 282 с.
- Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.; Л.: Наука, 1965. 374 с.
- Жаков Л. А., Меншуткин В. В. Практические занятия по ихтиологии: Учебное пособие. Ярославль: Ярославский ун-т, 1982. 112 с.
- Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- Крогиус Ф. В. Японский лососевый промысел в открытом море и его влияние на запасы красной // Рыбное хозяйство. 1961. № 2. С. 23–36.
- Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FUZZY TECH. СПб.: БХВ, 2003. 736 с.
- Меншуткин В. В. Опыт прогнозирования динамики численности озерной красной на основе кибернетической модели этого стада // Труды ВНИРО. 1969. Т. 67. С. 88–100.
- Меншуткин В. В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л.: Наука, 1971. 196 с.
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии». Ординальные и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 2. С. 160–171.
- Попов Э. В., Фоминых И. Б., Кисель Е. Б., Шапот М. Д. Статические и динамические экспертные системы. М.: Финансы и статистика, 1996. 320 с.
- Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системе управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
- Поспелов Д. А. (ред.). Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986. 312 с.
- Тутубалин В. Н., Барбашева Ю. М., Григорян А. А., Девятков Г. И. Математическое моделирование в экологии: историко-методологический анализ. М.: Языки русской культуры, 1999. 208 с.
- Форсайт Р. (ред.). Экспертные системы. Принципы работы и примеры. М.: Радио и Связь, 1987. 223 с.
- Chen D., Hargreaves D. M., Lui Y. A fuzzy logic model with genetic algorithm for analyzing stock-recruitment relationships // Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science. 2000. Vol. 57 (3). P. 1878–1887.
- Droesen W. J. Formalization of ecohydrological expert knowledge applying fuzzy techniques // Ecological Modelling. 1996. Vol. 85 (1). P. 75–81.
- Hannon B., Ruth M. Modeling dynamic biological systems. NY; Berlin: Springer, 1997. 400 p.
- Kaufman A., Gupta M. Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications. NY: VanNostrand Reinhold, 1985.
- Keller R. H., Dungan J. L. Meta-modelling: a knowledge-based approach to facilitating process model construction and reuse // Ecological Modelling. 1999. Vol. 119 (2–3). P. 89–116.
- Lembach M. Expert system – model coupling with the framework of an ecological advisory system // Ecological Modelling. 1994. Vol. 75/76. P. 589–600.
- Mackinson S. An adaptive fuzzy expert system for predicting structure, dynamics and distribution of herring shoals // Ecological Modelling. 2000. Vol. 126 (2–3). P. 155–178.
- Recnagel F., Petzoldt T., Jaenke O., Krusche F. Hybrid expert system DELAQUA – a toolkit for water quality control of lakes and reservoirs // Ecological Modelling. 1994. Vol. 71 (1–3). P. 17–36.
- Robb C. A., Peterman R. M. Application of Bayesian decision analysis to management of a sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) fishery // Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science. 1998. Vol. 55 (1). P. 86–98.
- Saila S. B., Lorda E., Miller J. D. et al. Equivalent adult estimates for losses of fish eggs, larvae and juveniles at Seebrook Station with use fuzzy logic to represented parametric uncertainty // North American Journal of Fishes Management. 1997. Vol. 17 (4). P. 811–825.
- Salski A. Fuzzy knowledge-based models in ecological research // Ecological Modelling. 1992. Vol. 63 (1). P. 103–112.
- Starfield A. M., Farm B. P., Taylor R. H. A rule-based ecological model for management of an estuarine lake // Ecological Modelling. 1989. Vol. 46 (1–2). P. 107–119.
- Sterbacek Z., Skopek V., Zavazal V. A composite landscape ecology prognostic expert system – COLEPS. Part I // Ecological Modelling. 1990. Vol. 50 (1–3). P. 145–156.
- Tuma A., Haasis H.-D., Rentz O. A comparison of fuzzy expert systems, neural networks and neuro-fuzzy approaches. Controlling energy and water flows // Ecological Modelling. 1996. Vol. 85 (1). P. 93–98.
- Zade L. A. Fuzzy logic = computing with words // Computing with words in information intelligent system (eds. Zade L. A., Kacprzyk J). 1999. Physia Verlag, Heidelberg. P. 3–23.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Меншуткин Владимир Васильевич
главный научный сотрудник, д. б. н.
Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН
ул. Чайковского, 1, Санкт-Петербург
эл. почта: vvm@emi.nw.ru
тел.: (812) 2737953

Menshutkin, Vladimir
St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, Russian Academy of Science
1 Chaikovsky St., St. Petersburg
e-mail: vvm@emi.nw.ru
tel.: (812) 2737953

УДК 622.341.1: 6222.772

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ РУДЫ КОСТОМУКШСКОГО И КОРПАНГСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Н. Е. Кулакова, П. А. Лозовик

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Методом лабораторного моделирования выявлены особенности выщелачивания минеральных компонентов из железной руды различных карьеров Костомукшского ГОКа. Проведенные опыты позволили понять причины и установить, что изменение химического состава воды хвостохранилища связано в основном с добычей и переработкой руды центрального карьера.

Ключевые слова: выщелачивание, кумулятивные кривые накопления, Костомукшский ГОК.

N. E. Kulakova, P. A. Lozovik. EXPERIMENTAL LEACHING OF ORE FROM THE KOSTOMUKSHA AND KORPANGA IRON ORE DEPOSITS

The parameters of the mineral compounds leaching from iron ore from various quarries of the Kostomuksha mining and ore processing plant was determined by laboratory modeling. The experiments allowed us to understand the causes, and find that the tailings chemical composition changed mostly under the impact of extraction and processing of ore from the central quarry.

Key words: leaching, cumulative curve accumulation, Kostomuksha mining & processing plant.

Введение

Костомукшский ГОК (ОАО «Карельский окатыш») является крупнейшим предприятием горнодобывающей промышленности в Республике Карелия на протяжении долгих лет. Комбинат производит железные окатыши из руды Костомукшского и Корпангского месторождений и располагается на северо-западе республики, вблизи г. Костомукши. Для производственных целей на месте бывшего оз. Костомукшского было создано хвостохранилище, которое используется для захоронения отходов производства (хвостов) и оборотного водоснабжения комбината. Формирование химического состава воды хвостохранилища происходит в основном за счет выщелачивания минеральных компонентов из руды при контакте с оборотной

водой в технологическом цикле и при взаимодействии «хвостов» с водой непосредственно в хвостохранилище. К особенностям состава воды хвостохранилища следует отнести сравнительно высокую ее минерализацию, а также преобладание в ионном составе K^+ (49 %-экв.) и SO_4^{2-} (71 %-экв.). Кроме того, вода хвостохранилища отличается высоким содержанием нитратов (7,3 мг N/л), лития (75 мкг/л) и алюминия (62 мкг/л) (по данным 2010 г.). Многолетняя динамика состава воды хвостохранилища описана ранее [Феоктистов, Сало, 1990; Феоктистов и др., 1992; Пальшин и др., 1994; Поверхностные воды..., 2001; Лозовик и др., 2007, 2010]. В последнее десятилетие в воде хвостохранилища отмечается рост суммы главных ионов (Σ_n) (650 мг/л в 2010 г. против 454 мг/л в 2000 г.), а также содержания K^+ (159 и 115 мг/л) и SO_4^{2-}

(298 и 125 мг/л) соответственно. В предшествующий период наблюдался рост концентрации нитратов, содержание которых в последние годы остается относительно постоянным, но на высоком уровне (среднее значение за 1998–2010 гг. составило 8,8 мг N/л) по сравнению с началом эксплуатации хвостохранилища (в среднем 0,7 мг/л за период 1984–1989 гг.).

Целью работы было выяснить причины изменения химического состава воды хвостохранилища за последнее десятилетие.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные опыты по выщелачиванию руды из различных карьеров Костомукшского ГОКа аналогично методике [Феоктистов, Сало, 1990]. В опытах названных авторов после каждого пробоотбора использовались свежие образцы руды, и они имитировали работу оборотного водоснабжения в системе «обогащительная фабрика – хвостохранилище». В наших опытах использовался один и тот же образец руды, и эти опыты имитировали выщелачивание компонентов при технологической переработке руды и после поступления отработанной пульпы в хвостохранилище.

Образцы руды были взяты с трех действующих карьеров Костомукшского (центрального и северного) и Корпангского (западного) месторождений. Мелко раздробленную руду (фракция частиц менее 1 мм) массой 200 г заливали дистиллированной водой объемом 1 дм³ (соотношение «порода – вода» по весу – 1 : 5). Исходное количество опытных сосудов было 8, и оно уменьшалось на единицу после каждого пробоотбора. Ежедневно опытные растворы тщательно перемешивали и после суточного (или более по схеме опыта) отстаивания сливали воду из всех стаканов в одну емкость, отбирали 1 литр на химические анализы, а остаток воды разливали в оставшиеся с рудой опытные стаканы по 1 литру. В опытах с рудой западного карьера отбор проб на химический анализ осуществляли на 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 и 15 сутки с момента их постановки, а в опытах с рудой центрального и северного карьеров – на 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 сутки. В связи с наличием большого количества мелкодисперсной взвеси, которую невозможно было удалить фильтрованием, пробы воды для анализов подвергались центрифугированию.

В водных вытяжках измерялись электропроводность и pH, а также определялось содержание следующих компонентов: K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, N_{орг}, P_{мин}, P_{общ}

Fe, Mn, Si по аттестованным методикам [Ефременко, 2007] в соответствии с областью аккредитации Госстандартом России лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН.

Результаты и их обсуждение

Опыты по выщелачиванию позволили получить кумулятивные кривые накопления веществ в воде при взаимодействии ее с рудой различных карьеров Костомукшского ГОКа и выявить особенности поступления минеральных веществ из руды в воду.

На большинстве кумулятивных кривых накопления отмечается быстрый рост концентрации веществ в первые сутки и более медленное их поступление в последующие (рис. 1). Это связано с тем, что в первый момент контакта руды с водой происходило поступление легкорастворимых солей с поверхности частиц породы (конгруэнтное растворение), чему способствовал мелкий размер частиц. Далее шло медленное выщелачивание компонентов из труднорастворимых пород (инконгруэнтное растворение). Наглядным подтверждением этого является характер выщелачивания NH₄⁺ и NO₃⁻, которые появились в воде на первые сутки, а далее их концентрации оставались неизменными, т. е. в воду сразу перешли остатки легкорастворимой аммиачной селитры – компонента взрывчатых веществ.

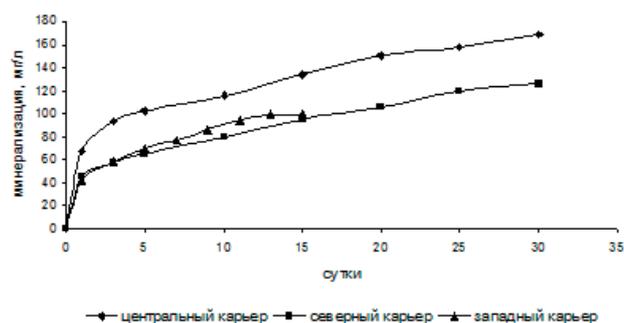


Рис. 1. Изменение минерализации воды при выщелачивании компонентов из руды карьеров Костомукшского ГОКа

По результатам опытов по выщелачиванию отдельных компонентов были рассчитаны скорости накопления веществ в воде (табл. 1) за первые и последующие сутки контакта руды с водой. Для большинства минеральных компонентов, за исключением Mg²⁺, начиная с третьих суток и до конца опытов наблюдался линейный рост их концентрации, поэтому для этого периода рассчитывалась средняя скорость выщелачивания. Среди минеральных компонентов наиболее быстро происходило выщелачивание

Таблица 1. Скорость выщелачивания минеральных компонентов из руды Костомукшского и Корпангского месторождений ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$)

Компонент	Западный карьер		Центральный карьер		Северный карьер	
	1-е сутки	3-15-е сутки	1-е сутки	3-30-е сутки	1-е сутки	3-30-е сутки
K^+	8,9	1,6	14,3	0,2	5,7	0,3
Ca^{2+}	2,5	0,3	16,0	0,95	5,8	0,4
Na^+	1,3	0,2	2,3	0,1	1,1	0,1
Mg^{2+}		0,1	1,8	0,1		0,1
SO_4^{2-}	1,9	0,4	7,6	2,0	2,5	0,2
HCO_3^-	36,5	3,2	24,8	1,7	29,2	1,9

HCO_3^- , K^+ , Ca^{2+} и SO_4^{2-} , тогда как поступление в воду Na^+ и Mg^{2+} шло значительно медленнее. При этом из руды центрального карьера больше выщелачивалось ионов K^+ , Ca^{2+} и SO_4^{2-} , но несколько меньше HCO_3^- , чем из руды остальных карьеров. Следует отметить, что в многолетнем плане в воде хвостохранилища наблюдается тенденция роста концентрации SO_4^{2-} и уменьшения гидрокарбонатов [Лозовик и др., 2010]. Окисление сульфидных пород в руде приводит к образованию серной кислоты и, как следствие этого, к уменьшению щелочности воды. Аналогичную картину удалось наблюдать в опытах с рудой западного карьера, когда к концу эксперимента резко возросла концентрация сульфатов, но уменьшилась щелочность и pH воды (рис. 2). Величина pH в опытах с рудой северного и центрального карьеров увеличивалась в начальный период и далее мало менялась до конца эксперимента, что связано с высокой щелочностью воды, обусловленной содержанием гидрокарбонатов.

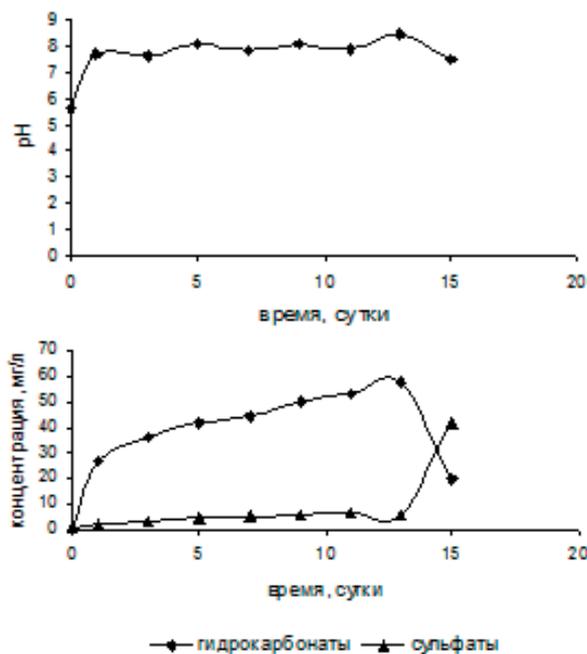


Рис. 2. Изменение величины pH (а), содержания гидрокарбонатов и сульфатов (б) в опытных растворах с рудой западного карьера

Сравнение поступления азотистых веществ показало, что больше всего их выщелачивается из руды центрального карьера. Так, к концу опытов содержание NH_4^+ и NO_3^- в водных вытяжках из руды этого карьера составило 15 и 29 мг N/л, тогда как в северном – 0,6 и 0,3 мг N/л, а в западном – 0,2 и 0,04 мг N/л соответственно. Как уже указывалось ранее, их максимальное поступление наблюдалось в первые сутки и далее оставалось без изменений до конца опытов.

На ионном составе воды сказывалось выщелачивание всех минеральных компонентов и азотистых веществ. В связи со значительным поступлением NH_4^+ и NO_3^- из руды центрального карьера вода в первые трое суток проведения опыта относилась к нитратно-аммониевому типу, в дальнейшем в результате увеличения доли Ca^{2+} – к нитратно-кальциевому. В опытах с рудой западного карьера вода сначала была гидрокарбонатного класса группы кальция, а к концу опытов класс изменился на сульфатный. Следует отметить, что в начальный период эксплуатации хвостохранилища вода также относилась к гидрокарбонатно-калиевому типу, а в настоящее время – к сульфатно-калиевому. Такие изменения ионного состава воды, по-видимому, связаны с сульфидными породами, которые присутствуют в виде примесей в руде и влияние которых усиливается при длительной эксплуатации карьеров.

Поступление в воду литофильных элементов (Fe, Mn), а также $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ имело свои отличительные особенности. Так, выщелачивание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (рис. 3, а) было наибольшим в 1-е сутки, затем его концентрация в опытной воде уменьшалась до минимального значения, а к 20-м суткам – снова нарастала. Такая динамика содержания $\text{Fe}_{\text{общ}}$, по-видимому, связана с особенностями поведения форм Fe (II) и Fe (III). Вначале наблюдался активный переход Fe^{2+} в воду, затем было его окисление кислородом, содержащимся в воде, с образованием нерастворимых гидроксидов Fe (III) и, как следствие, уменьшение концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$. Далее снова начиналось выщелачивание Fe^{2+} из породы в воду.

Аналогично железу изменялось содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ (рис. 3, б), что свидетельствует об определяющей роли форм железа в миграции соединений фосфора (фосфат железа (II) более растворим, чем Fe (III)).

Подобно выщелачиванию железа выглядит и распределение концентрации марганца, как спутника железа (рис. 3, в), но оно менее контрастно, поскольку Mn^{2+} окисляется до Mn (IV) более медленно, чем Fe^{2+} до Fe (III).

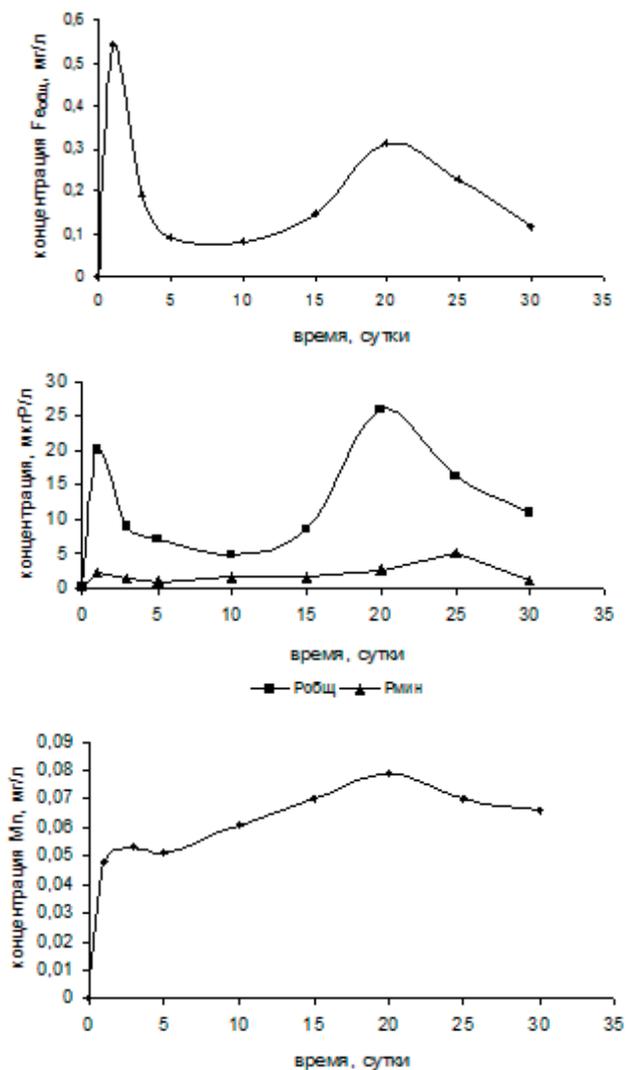


Рис. 3. Изменение содержания железа общего (а), фосфора (б) и марганца (в) в опытных растворах с рудой центрального карьера

На основе проведенных опытов выполнена оценка выноса компонентов из руды и «хвостов» в воду (при данном соотношении порода – вода) от различных карьеров ($m = 5C_{cp}$, где m – поступление вещества из руды, г/т руды,

а C_{cp} – среднее количество вещества в 1 литре водных вытяжек за весь период ($C_{cp} = \sum C_i / 8$, мг)) (табл. 2). Проведенные опыты в соответствии с их схемой позволяют оценить поступление веществ из 1 т руды при ее технологической переработке и при дальнейшем взаимодействии отработанной пульпы с водой хвостохранилища. Для этих целей больше подходят средние значения показателей выщелачивания за весь промежуток опытов, отражающие как конгруэнтное, так и инконгруэнтное растворение.

б Как видно из табл. 2, из руды центрального карьера поступает в воду очень много минеральных веществ (618 г/т руды), в том числе калия (89 г/т руды) и сульфатов (74 г/т руды), и азотистых соединений (199 г N/т руды), тогда как из руды остальных карьеров вынос этих веществ был в 2–20 раз меньше. По сравнению с другими карьерами, центральный карьер вносит основной вклад в поступление азотистых веществ и минеральных солей в воду хвостохранилища.

в Сравнение результатов опытов, выполненных в 2010 г. и 1980-х гг. [Феоктистов, Сало, 1990], представляет определенные сложности, поскольку в последнем в каждом последующем цикле использовались новые порции руды, а вода – предшествующего. Эти опыты фактически фиксировали только конгруэнтное растворение в отличие от наших, в которых учитывалось как конгруэнтное, так и инконгруэнтное растворение.

Ориентировочный расчет C_{cp} и выноса веществ из 1 т руды в опытах 1980-х гг. был выполнен по соотношению средней концентрации и наблюдаемой в первые сутки (C_1) по данным опытов 2010 г. Сравнение среднесуточного поступления веществ в первые сутки в наших опытах и в течение пяти суток в опытах 1980-х гг. (табл. 2) показывает, что большее выщелачивание K^+ , SO_4^{2-} и главных ионов наблюдается в последние годы, чем это имело место 20 лет назад. В то же время выщелачивание

Таблица 2. Концентрация компонентов в водных вытяжках и их поступление в воду из руды карьеров Костомукшского ГОКа по результатам опытов 2010 г.

Компонент	C_1	C_{cp}	m	C_1	C_{cp}	m	C_1	C_{cp}	m
	мг/л			г/т			мг/л		
	Центральный карьер			Северный карьер			Западный карьер		
K^+	14,3 (11,8*)	17,7	89 (73*)	5,7	10,0	50	8,9	19,6	98
SO_4^{2-}	7,6 (4,0*)	14,8	74 (39*)	2,5	5,0	25	1,9	9,3	47
HCO_3^-	24,8 (35,7*)	54,6	273 (393*)	29,2	55,6	278	26,5	41,0	205
$\sum_{и}$	68,0 (59,9*)	123,6	618 (544*)	45,4	86,7	434	41,7	78,1	391
$N_{общ}$	37,6	39,8	199	1,3	1,6	8	0,6	0,6	3
Si	0,32	1,4	7	1,2	3,4	17	1,3	2,6	13
$Fe_{общ}$	0,54	0,21	1,1	1,2	1,7	9	1,0	2,5	13
$P_{общ}$	0,02	0,01	0,05	0,03	0,02	0,1	0,06	0,07	0,4

Примечание. * – по результатам опытов 1989 г. [Феоктистов, Сало, 1990].

HCO_3^- имеет обратную картину, чем для ионов K^+ и SO_4^{2-} . Выносы веществ из 1 т руды соотносятся аналогичным образом, что и среднесуточное поступление (табл. 2).

Установленные особенности выщелачивания различных лет наблюдений согласуются с общей тенденцией изменения состава воды хвостохранилища в многолетнем плане. Кроме того, эти результаты подтверждают вывод о том, что основной вклад в формирование химического состава воды хвостохранилища вносит руда центрального карьера.

Таким образом, проведенные опыты позволили выявить особенности выщелачивания минеральных компонентов, определить их скорости, а также выполнить оценку их выноса из 1 т руды и понять причины изменения химического состава воды хвостохранилища за последние десятилетия.

Выводы

Методом лабораторного моделирования выявлены особенности выщелачивания минеральных компонентов из железной руды различных карьеров Костомукшского ГОКа. При взаимодействии руды с водой в начальный момент наблюдается быстрое поступление в воду легкорастворимых веществ, находящихся на поверхности руды (конгруэнтное растворение). В дальнейшем происходит медленное выщелачивание компонентов из труднорастворимых пород (инконгруэнтное растворение).

Из руды центрального карьера в воду минеральных и азотистых веществ поступает больше, чем из руды северного и западного карье-

ров. Поскольку основная добыча руды осуществляется из центрального карьера, основные изменения состава воды хвостохранилища в последнее десятилетие связаны с эксплуатацией именно этого карьера.

Литература

Ефременко Н. А. Методы отбора и химического анализа проб воды // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 10–12.

Лозовик П. А., Калмыков М. В., Дубровина Л. В. Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав техногенных вод // Там же. С. 100–106.

Лозовик П. А., Калмыков М. В., Кулакова Н. Е. Многолетняя динамика изменения режима системы р. Кенти под влиянием техногенных вод Костомукшского ГОКа // Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения: Материалы докл. Всерос. конф. (Апатиты, 4–8 окт. 2010 г.). Апатиты, 2010. С. 203–208.

Пальшин Н. И., Сало Ю. А., Кухарев В. И. Влияние Костомукшского ГОКа на экосистему р. Кенти. Гидрологические и гидрохимические аспекты // Исследование и охрана водных ресурсов Белого моря (в границах Карелии). Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1994. С. 140–161.

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия / П. А. Лозовик, С.-Л. Марканен, А. К. Морозов и др. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2001. 168 с.

Феоктистов В. М., Сало Ю. А. Режим эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОКа. Практические рекомендации. Петрозаводск: Карельский НЦ АН СССР, 1990. 42 с.

Феоктистов В. М., Тимакова Т. М., Калугин А. И. Влияние Костомукшского ГОКа на водную систему Кенти-Кенто // Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск, 1992. С. 63–78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кулакова Наталия Евгеньевна

инженер-исследователь
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Лозовик Петр Александрович

зав. лаб. гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Kulakova, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Lozovik, Pyotr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 631.432

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОЗАПАСОВ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТАХ КАРЕЛИИ: ИНЖЕНЕРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

И. М. Нестеренко, С. Л. Матвеев

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Снижение температуры воздуха и увлажненных почв ведет к повышению влажности промерзающего слоя, изменению водно-физических свойств. В глинах и суглинках образуются линзы и прослойки льда, нарушается устойчивость грунтов и сооружений при оттаивании, усиливается вынос взвешенных и растворенных веществ.

Ключевые слова: снег, промерзание, влагоемкость, объемная масса, водоотдача, устойчивость грунтов и сооружений.

I. M. Nesterenko, S. L. Matveev. MOISTURE REDISTRIBUTION IN FREEZING SOILS IN KARELIA: ENGINEERING AND ECOLOGICAL PROBLEMS

Reduction in the temperature of the air and moisture-bearing soils results in an increase in the moisture content in the frozen layer, a change in hydrophysical properties. Ice lenses and bands form in clays and loams, the stability of grounds and buildings at thawing is affected, leaching of suspended and dissolved matter intensifies.

Key words: snow, freezing, water capacity, volume weight, water yield, ground and building stability.

При проектировании, строительстве и эксплуатации дорог, мелиоративных объектов и сооружений на них, в водохозяйственных и гидрологических расчетах, в связи с необходимостью учета сезонного перераспределения влагозапасов, изменения водно-физических свойств почвогрунтов при их промерзании, при изучении процессов эрозии и выноса взвешенных и растворенных веществ в водоприемники немаловажную роль играет знание процессов промерзания и оттаивания почвогрунтов. В России этим вопросам начали уделять большее внимание со второй половины прошлого века [Нестеренко, Симанов, 1969]. Об этом свидетельствуют и материалы последних симпозиумов по физике, химии и экологии сезонно промерзающих почв [Nesterenko, Sinkevitsch, 1992; International symposium..., 1997].

Объекты и методы исследований

Торфяники, ленточные суглинки и глины имеют широкое распространение на северо-западе России. Приурочены они в основном к озерно-ледниковым равнинам и являются первоочередными объектами проведения мелиоративных работ для улучшения сельскохозяйственных и лесных угодий. В Карелии это Олонецкая (бассейн Ладожского озера), Корзинская низины и Ладвинская равнина (бассейн Онежского озера). Часто ленточные отложения залегают близко к поверхности и в них врезается осушительная сеть. Эти отложения имеют различный механический состав – от легких суглинков до тяжелых глин. В ленточных глинах Корзинской низины отмечено абсолютное преобладание пылеватой и высокое содержание глинистой фракции (20–75 %) [Нестеренко, Стрелкова,

2006]. Характерным для ленточных отложений является снижение их прочности при нарушении естественной структуры. Они находятся в скрыто-текучем, реже – пластичном состоянии и при нарушении естественного сложения легко переходят в текучее [Ломтадзе, 1965]. С ростом объемов капитального строительства в 60-е гг. прошлого века в Карелии (дороги, гидротехнические сооружения, мелиоративные системы и т. д.) встал вопрос о необходимости детального изучения этих процессов. На первом этапе (1950–1960-е гг.) разрабатывались методы исследований сезонно промерзающих почвогрунтов, проводилась оценка особенностей изменения водно-физических свойств в пахотном слое и подстилающих горизонтах, способов защиты почв от эрозии и гидротехнических сооружений от разрушения [Нестеренко, 1967].

Полевые и лабораторные исследования проводились с 1963 г. на Корзинском научном стационаре Института биологии, расположенном в южной части Карелии, в 70 км западнее Петрозаводска [Нестеренко, Стрелкова, 2006]. На стационаре имеется участок неосушенного болота (НП-4 – наблюдательный пункт № 4). Площади с торфяной залежью низинного и переходного типа мощностью до 3 м осушены в 1962–1963 гг. дощатым дренажем с расстоянием между дренами 40 м в зоне атмосферного водного питания. В истекшие годы проводился ремонт открытой проводящей сети, а в 1980-е гг. в зоне повышенного грунтового водного питания (полоса 5) были заложены дополнительные дрены. На стационаре до 1994 г. действовал метеорологический пункт (МП), который был зарегистрирован в системе Гидрометеослужбы. Торфяник в зоне грунтового-напорного водного питания осушен дощатыми дренами через 20 м с дополнением в последующем полиэтиленовых и гончарных дренах (НП5). Тяжелосуглинистые почвы, подстилаемые ленточными глинами, осушены гончарным дренажем с расстояниями между ними 8, 12 и 20 м (НП-3). В основном до 1994 г. на стационаре проводились круглогодичные наблюдения за осадками, испарением, стоком, температурой воздуха и почвы, промерзанием почвы, влажностью и водно-физическими свойствами почвогрунтов, уровнями грунтовых вод и др.

Влажность почвы в течение года, в том числе и в зимний период, определяли 2 раза в месяц на глубину до 1 м специальным буром, состоящим из двух тонкостенных полуцилиндров (разрезана труба из нержавеющей стали), соединяемых специальным замком, с хорошо заостренной пилообразной нижней частью.

Это позволяло одновременно отбирать почву на всю глубину. После разделения бура на две части специальным ножом вырезался образец длиной 10 см, который полностью помещался в 5 бюкс для высушивания. Постоянный объем образца позволял в конечном итоге определять как весовую, так и объемную влажность, рассчитывать послойные запасы влаги.

Образцы с ненарушенной структурой в мерзлом слое отбирали и переоборудованным для почвы ледовым буром [Нестеренко, 1971]. На границе промерзания брали дополнительно образцы из примыкающего к мерзлому (2–5 см) талого грунта. Бур-кольцо позволял как в мерзлых торфах, так и в глинах (без включений песка) отбирать пробы на влажность и монолит диаметром 10 см при промерзании до 60 см. Монолит использовался для изучения льдистости, объемной массы, водоотдачи, влажности.

На различных типах почв и вариантах осушения устанавливались мерзлотомеры и приборы нашей конструкции для непрерывной регистрации вспучивания почвы [Нестеренко, 1979]. Были организованы наблюдения за деформацией каналов с целью выяснения причин значительного разрушения их откосов в слоистых глинах и суглинках при промерзании и оттаивании.

Результаты исследований

Многолетние (1963–1994 гг.) наблюдения позволили оценить вариабельность основных климатических характеристик – температуры, глубины промерзания различных почв и высоты снежного покрова на конец зимы (табл. 1), которые в значительной степени определяют формирование влагозапасов, их перераспределение, изменение водно-физических свойств почвы и ее вспучивание при промерзании.

Таблица 1. Промерзание и высота снежного покрова, Корзинская низина, 1963–1994 гг.

Показатель	Промерзание, Нм, см			Снег, Нс, см	
	МП	НП-4	НП-3	МП	НП-4
X	38	22	52	39	59
X _{min}	14	1,0	32	12	32
X _{max}	61	48	78	71	89
σ	11,7	12	11,6	13,7	14,5
Cv	0,31	0,55	0,22	0,35	0,25

Примечание. X – средняя многолетняя величина; σ – стандартное отклонение; Cv – коэффициент вариации.

Высота снежного покрова на неосушенной и частично залесенной части торфяника более чем в 1,5 раза выше, глубина промерзания примерно на ту же величину ниже. Большая вариабельность (Cv) глубины промерзания на НП-4 обусловлена тем, что на окраине неосушенной

части болота в зоне разгрузки грунтовых вод в отдельные годы наблюдалось даже отсутствие мерзлоты, а при ее наличии подмерзлотные воды находились под напором. Многофакторный регрессионный анализ выявил достаточно надежные связи глубины промерзания (H_m) с суммой отрицательных температур (Σt), среднемесячной из средних минимальных (t_{\min}) и с высотой снежного покрова (H_c):

$$\begin{aligned} &\text{осушенные торфяные почвы} \\ &H_m = 27,8 + 0,0214\Sigma t - 0,434H_c, \\ &R = 0,69, p = 0,001, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &H_m = 12,7 - 3,26t_{\min} - 0,434H_c, \\ &R = 0,69, p = 0,001; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{осушенные минеральные почвы} \\ &H_m = 39,5 + 0,024\Sigma t - 0,047H_c, \\ &R = 0,70, p = 0,0004. \end{aligned} \quad (3)$$

Наибольшая глубина промерзания наблюдается в минеральных почвогрунтах на участке НП-3, величина ее в отдельные годы более чем в 2 раза превышает промерзание торфяных почв (табл. 1).

Отмечается устойчивое потепление климата на Европейском Севере и рост осадков [Климат Карелии..., 2004] и, соответственно, связанное с этими процессами уменьшение глубины промерзания и перераспределение влагозапасов.

Перераспределение влагозапасов в промерзающих грунтах зависит от температуры, глубины снежного покрова, предзимнего увлажнения. Ранее была установлена зависимость между скоростью промерзания и увеличением влажности нижнего слоя мерзлого грунта по отношению к прилегающему талому [Нестеренко, 1969]. При влагозапасах на начало зимы до 80–90 % от полной влагоемкости и увеличении их за зиму на 7–17 % в торфяных и до 30 % в минеральных почвогрунтах промерзание приводит к росту запасов влаги сверх как полевой, так и полной влагоемкости (табл. 2),

что ведет к существенному росту водоотдачи почвогрунтов.

Надежные уравнения связи для изменения влагозапасов dW в слое 0–50 см в торфяных почвах на МП за холодный период (октябрь – март) имеют вид:

$$\begin{aligned} dW_3 &= 0,123H_m - 0,7W_{нз} - 0,1T + 278, \\ R &= 0,75, \end{aligned} \quad (4)$$

в зоне обильного грунтово-напорного водного питания (НП 5):

$$\begin{aligned} dW_5 &= 0,282H_{нз} - 0,86W_{нз} - 0,10T + 224; \\ R &= 0,86, \end{aligned} \quad (5)$$

в минеральных почвах (НП-3):

$$\begin{aligned} dW_m &= 0,283T - 0,47W_{нз} + 0,40H_m + 138, \\ R &= 0,42. \end{aligned} \quad (6)$$

Меньшая, но достоверная связь в минеральных грунтах обусловлена неоднородным накоплением влаги и льда в линзах и прослойках.

При переходе воды в лед и увеличении ее объема в среднем на 9 % происходят существенные изменения структуры и физических свойств грунтов. Мерзлый осушенный торф представляет сплошную массу с редкими тонкими прослойками льда. В верхнем слое вспаханных почв в пустотах часто наблюдается образование кристаллического льда в значительных количествах. Мерзлый торф становится практически водонепроницаемым, а это способствует формированию поверхностного стока с началом снеготаяния [Нестеренко, 1971].

В плотных минеральных почвах при уровнях грунтовых вод 0,8 м и более в верхних слоях при значительной скорости промерзания образуются тонкие прослойки и линзы льда толщиной до 1–2 мм через каждые 5–10 мм. И лишь у нижней границы при замедлении скорости промерзания начинает формироваться мощная прослойка льда, толщина которой к весне достигает иногда 5–10 см. При этом увеличение глубины промерзания во вторую половину

Таблица 2. Перераспределение почвенных влагозапасов в зимний период, 1964–1986 гг.

Характеристики	Точки	Глубина, см	X, мм	X _{min} , мм	X _{max} , мм	σ	W/W _{пв} , %	
Начальные влагозапасы, W	МП	0–20	122	71	170	23,6	71,8	0,19
		0–50	314	217	383	44,0	73,9	0,14
		0–100	688	480	825	87,2	80,9	0,13
	НП5	0–20	130	80	168	64,3	76,4	0,20
		0–50	389	284	433	42,4	>100	0,12
		0–100	485	336	675	93,9	16,5	0,19
	НП3	0–20	100	56	146	31,5	85,4	0,32
		0–50	239	100	347	68,1	>100	0,28
		0–100	485	336	675	93,9	16,5	0,19
Увеличение влагозапасов за зиму	МП	0–20	28	2	76	17,1	12,2	0,61
		0–50	52	3	190	14,4	7,4	0,28
		0–100	63	11	211	49,9	17,1	0,79
	НП5	0–20	29	0	68	23,9	13,2	0,82
		0–50	56	0	113	38,7	6,7	0,69
		0–100	57	0	108	35,8	30,8	0,63
	НП3	0–20	37	11	84	19,7	29,6	0,53
		0–50	83	29	151	34,5	26,5	0,42
		0–100	127	43	238	50,6		0,40

зимы происходит в основном за счет увеличения мощности нижней прослойки льда, под которой обычно наблюдается талый грунт.

При более высоком стоянии уровней грунтовых вод ленточные глины и суглинки насыщены многочисленными прослойками и линзами льда. Иногда наблюдается образование пустот в мерзлом слое за счет разобщенности ядер кристаллизации, неравномерного накопления льда в отдельных точках и возникновения значительных сил выпучивания. Все это приводит к значительному подъему поверхности почвы (до 20 см), смещению отдельных слоев, оползням на откосах каналов [Нестеренко, 1967].

Увеличение количества влаги и расширение ее при промерзании приводит к уменьшению объемной массы мерзлого почвогрунта (γ_m). При насыщении грунта водой до полной влагоемкости и выше ее в зоне промерзания объемная масса может быть рассчитана по уравнению:

$$\gamma_m = \rho / (1 + 1,09W_m), \quad (7)$$

где ρ – плотность, г/см³; W_m – весовая влажность мерзлой почвы, г/г.

Расчеты объемной массы мерзлого торфа по уравнению (7) при $W_m > 4,5$ г/г дали очень близкие значения к ее фактическим значениям. Следовательно, зная плотность твердой фазы почвы, мало изменяющейся в течение ряда лет, и определив влажность, можно рассчитать объемную массу и перевести весовую влажность в объемную (W_o), получить водоотдачу: $\mu = W_o - W_{ппв}$, где $W_{ппв}$ – полевая предельная влагоемкость, %.

Для облегчения расчетов были предложены графики и таблицы [Нестеренко, 1979].

Запас свободной влаги в слое мерзлого осушенного торфа иногда достигает 100 мм, в минеральных почвогрунтах – 150 мм.

По данным непрерывных наблюдений за высотой вспучивания в минеральных грунтах была получена зависимость ее за определенный период (от 3 до 15 сут) от условий зимнего режима:

$$\Delta H_p = 1,3 + 0,0535\Delta H_m - 0,012H_m - 0,0094H_c - 0,0047\Sigma t, \quad r = 0,76, \quad (8)$$

где H_p – высота вспучивания за период, см; ΔH_m – изменение глубины промерзания, см; H_m – общая глубина промерзания на начало периода, см; Σt – сумма среднесуточных температур воздуха за расчетный период, °С.

В откосах мелиоративных каналов процессы влагонакопления при промерзании проходят более интенсивно за счет более интенсивного притока грунтовых вод. При значительной скорости промерзания в верхнем слое откоса образуется большое количество тонких про-

слоек и линз льда толщиной до 5 мм. Мощная прослойка, толщина которой к весне достигает 6–10, а иногда и 15 см, формируется у нижней границы мерзлого слоя при заполнении каналов снегом и снижении скорости промерзания. Часто здесь же образуются значительные пустоты за счет неравномерного льдонакопления и вспучивания грунта. Наиболее интенсивно эти процессы протекают при наличии напорного водного питания. Весной при оттаивании грунтов по линзам и прослойкам льда наблюдается оплывание откосов каналов и их значительное разрушение, обильный вынос взвешенных и растворенных веществ в водоприемники.

В первые годы после строительства закрытых дренажных систем при наличии рыхлой засыпки над дренами и просадки ее талые поверхностные воды устремляются по трассам дрен и закрытых коллекторов, вызывая размыв верхнего оттаявшего слоя почвы, устьевых участков коллекторов. В отдельных точках через пустоты и рыхлую засыпку вода устремляется в дрены, что часто при недоброкачественном строительстве приводит к заилению дрен или к выносу растворенных питательных и взвешенных веществ из верхнего слоя почвы, значительному ухудшению качества воды в водоприемниках.

Был разработан и внедрен на значительных площадях способ защиты откосов каналов в морозоопасных грунтах [Нестеренко, 1967]. На дне канала устраивалась подпорная стенка и откосы перекрывались торфом, торфяным дерном, почвой из пахотного слоя или песком. На площадях, где глины или суглинки перекрыты слоем торфа мощностью до 0,5 м, работы были полностью механизированы: нижняя часть откосов каналов, которая проходит в минеральном грунте, перекрывалась слоем торфа до 20–25 см, срезаемого с приканавной полосы, и засеивалась травами. В течение последующих 15–20 лет на таких каналах разрушения не наблюдались. Для сохранения устойчивости откосов более мелкой регулирующей сети каналов целесообразно выполнять их в виде ложбин с заложением откосов до 6–8-кратного. Засыпку дрен необходимо проводить с запасом на просадку грунта.

Предложенные способы защиты откосов каналов и дренажных систем в морозоопасных грунтах широко использовались в мелиоративном строительстве в Карелии, в Ленинградской и других областях Северо-Запада и Европейского Севера России. Они не только увеличивают эксплуатационный срок службы гидротехнических сооружений, способствуют сохранению почвенного покрова, но играют и значительную роль в уменьшении отрицательных последствий

мелиораций на водные экосистемы – снижении эрозии, выноса растворенных и взвешенных веществ в водоприемники. Способ защиты дорожного полотна от промерзания с помощью торфяной дернины применялся в Финляндии [Frost..., 1997]

Был предложен и защищен авторским свидетельством способ мелиорации длительно сезонно мерзлотных почв тяжелого механического состава [Нестеренко, 1989]. Изобретение относится к сельскому хозяйству, в частности, к тепловой мелиорации почв. Оно позволяет снизить глубину промерзания почвы с улучшением ее структуры, водного и питательного режимов путем создания дернового подслоя в подошве пахотного слоя, что изменяет и улучшает термический режим почвы.

Литература

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. 224 с.

Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства позднеледниковых ленточных глин окрестностей Ленинграда // Зап. Ленингр. горн. ин-та. 1965. Т. XVIII, вып. 2.

Нестеренко И. М. Устойчивость и способы крепления откосов осушительных каналов в морозоопасных грунтах // Гидротехника и мелиорация. 1967. № 3. С. 92–96.

Нестеренко И. М. Методы исследования промерзающих торфяных и минеральных почвогрунтов

в КАССР // Метеорология и гидрология. 1971. № 3. С. 58–64.

Нестеренко И. М. Мелиорация земель Европейского Севера Европейского Севера СССР. Л.: Наука, 1979. 260 с.

Нестеренко И. М. Рекомендации по проектированию мелиоративных систем в Карельской АССР. Петрозаводск, 1980. 74 с.

Нестеренко И. М. Авторское свидетельство № 1554791 «Способ мелиорации длительно сезонно мерзлотных почв тяжелого механического состава». М.: Госкомизобретений, 1989. (Приоритет изобретения 10.03.1988.)

Нестеренко И. М., Симанов Ю. Г. Динамика влажности почвогрунтов в зимний период // Почвоведение. 1969. № 5. С. 105–112.

Нестеренко И. М., Стрелкова А. А. Корзинский научный стационар Республики Карелия // Мелиоративно-болотные стационары России. Составители Маслов Б. С. (РАСХН), Константинов В. К. (НИИЛХ), Бабиков Б. В. (НИИЛХ), Аhti Э. (НИИЛеса, Финляндия). Научный центр VANTAA. METLAA (Финляндия), 2006.

Frost action soils. Rotterdam: Lulea University of Technology, 1997. 540 p.

International Symposium on Physics, Chemistry, and Ecology of Seasonally Frozen Soils. Fairbanks, Alaska, June 10–12, 1997. 573 p.

Nesterenko I. M. Subsidence and wearing out of peat soils as a result of reclamation and agricultural utilization of marshland // Proc. of the VIPC. Vol. I. Poznan, Poland, 1976. P. 218–234.

Nesterenko I. M., Sinkevitch E. I. Mire drainage and change of suspended substance and solute removal into water courses // Proc. of IX IPC. Uppsala, Sweden, 1992. P. 285–295.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нестеренко Иван Михайлович

ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nim@onego.ru
тел.: 89214604586

Матвеев Сергей Леонидович

главный гидролог
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: sergey.matveev.1960@mail.ru
тел.: 89114050642

Nesterenko, Ivan

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nim@onego.ru
tel.: 89214604586

Matveev, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sergey.matveev.1960@mail.ru
tel.: 89114050642

УДК [556.332.62: 556.168]: 556.55

РОЛЬ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕР БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Г. С. Бородулина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Приведена характеристика гидрогеологических условий формирования подземного стока на водосборе Онежского озера. Дана количественная оценка водного и химического подземного стока непосредственно, минуя речную сеть, в отдельные озера бассейна р. Шуи (Сямозеро, Крошнозеро, Суоярви, Пряжинское) и Онежское озеро. Установлено, что доля прямого подземного стока в водном балансе озер незначительна, однако его влияние на химический состав озерной воды более значимо и нередко сравнимо с воздействием, оказываемым поверхностными водами. Наиболее важна роль прямого подземного стока в химическом балансе небольших озер.

Ключевые слова: подземные воды, водосбор Онежского озера, химический состав, подземный сток, химический баланс.

G. S. Borodulina. ROLE OF GROUNDWATER FLOW TO LAKES OF THE ONEGA WATERSHED IN FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATER

The hydrogeological conditions for formation of groundwater flow in the Onega catchment are characterized. Water and salt groundwater flow directly to Onega and some lakes of the Shuja River basin (Syamozero, Kroshnozero, Suojarvi, Pryazhinsky) avoiding the river network was quantified. We found that the share of direct groundwater flow in the lake water balance is insignificant, however its influence on the chemical composition of the lake water is more significant and comparable with that of the river discharge. The role of direct groundwater flow in the chemical balance is most important in small lakes.

Key words: groundwater, Onega watershed, chemical composition, groundwater flow, chemical balance.

Введение

Количественная оценка химического подземного стока и выяснение закономерностей его формирования имеет важное значение при исследовании многих проблем современной гидрохимии и необходима, прежде всего, для обоснования мероприятий по управлению водными ресурсами, направленных на поддержание оптимального водного, солевого и гидробиологического режима.

Несмотря на то что подземный сток остается трудноопределяемым и слабоизученным

компонентом водного и солевого баланса озер, необходимо ответить на ряд вопросов: каков объем разгружающейся воды, оказывает ли он влияние на водный и солевой баланс озера, каким образом изменится приток подземных вод в озера в условиях возможного изменения климата и увеличения техногенной нагрузки в береговой зоне.

Опыт исследований на ряде морей и крупных озер (Ладога, Байкал, Балхаш, Иссык-Куль, Великие озера, Каспийское море и др.) показывает, что, несмотря на относительно небольшое количество подземных вод, поступающих в

водоемы непосредственно, минуя речную сеть, их влияние на солевой состав и качество воды весьма значительно и сравнимо с воздействием, оказываемым поверхностными водами [Зекцер, Джамалов, 1989; Шабалина, Воронов, 2004]. Для водоемов Карелии количественная оценка формирования прямого подземного водного и солевого стока до последнего времени практически не проводилась.

Методы оценки подземного стока

Вопросы, посвященные оценке естественных ресурсов подземных вод на территории Карело-Кольского региона, рассматривались в работах многих исследователей: И. С. Зекцер и Л. Б. Ковальский [1963], Н. П. Небожева [1965], А. Н. Малявкин [1966], Е. И. Лось [1977], И. К. Поленов и Г. Н. Устинов [1980], А. В. Иешина и др. [1987], В. А. Всеволожский и Р. Н. Кочеткова [2003]. В этих работах оценка величины подземного стока проводилась методом расчета подземного притока в реки. Метод основан на анализе гидрограмм речного стока за многолетний период с выделением подземной составляющей. Региональная оценка подземного стока была выполнена И. К. Поленовым с учетом степени озерного регулирования рек, в отличие от большинства авторов, которые это условие не учитывали. Были рассчитаны значения среднегодового и минимального подземного стока для ряда наиболее изученных водосборов, в том числе для 18 водосборов бассейна Онежского озера. Наиболее обеспечена естественными ресурсами западная часть бассейна за счет более широкого развития песчаных массивов и расчлененности рельефа (модули стока 2–4 л/с · км²). Минимальные значения модуля подземного стока (до 1 л/с · км²) характерны для юго-восточной равнинной и заболоченной части. Коэффициент зимнего подземного питания рек, отражающий долю подземного стока в общем речном, в пределах бассейна Онежского озера изменяется от 22 до 95 %.

В расчете водного и химического баланса озер Карелии приход подземных вод количественно учтен в объеме среднесезонного речного стока, а прямой приток в водоемы подземных вод с прибрежной территории, не подверженной дренирующему воздействию рек и ручьев, прежде не принимался во внимание. Но именно в этой части водосборной площади озер располагаются основные очаги концентрированного загрязнения не только поверхностных, но и подземных вод: крупные промузлы, поселки, карьеры и многие другие хозяйственные объекты.

Подземный сток непосредственно в озера включает сток с междуречных пространств, родниковый сток береговой полосы и субаквальный приток в акватории озера. Существующие представления о формировании подземного стока, связанного с зонами тектонических нарушений и дренируемого основными областями разгрузки (Белое море, Ладожское и Онежское озера), крайне противоречивы. Одни исследователи [Зекцер, Ковальский, 1963; Пряхин, 1972] придерживаются взглядов о наличии значительных объемов глубокого регионального подземного стока в котловины моря и озер, другие [Всеволожский, Кочеткова, 2003] считают их чисто гипотетическими. Первым опытом изучения субаквальной разгрузки в озера Карелии являются результаты водно-гелиевой съемки придонного слоя воды в Петрозаводской губе Онежского озера [Поленов, Иешина, 1981]. Здесь в зоне разгрузки гдовского напорного водоносного горизонта гелиевая аномалия зафиксирована в полосе длиной 2 км и шириной 0,5 км, вытянутой параллельно берегу на расстоянии 1 км от него.

В основе изучения и количественной оценки подземного стока в озера (минуя речную сеть) лежат методы, основанные на количественном анализе условий формирования подземного стока в пределах водосборной и, прежде всего, в прибрежной его части. Для оценки подземного стока использовался гидродинамический метод расчета расхода подземного потока по известным аналитическим зависимостям, который широко применяется в практике гидрогеологических исследований [Джамалов и др., 1977; Зекцер, 2001].

Анализ геолого-гидрогеологического материала включает данные по 400 скважинам, пробуренным по всей прибрежной территории озер, а также результаты гидрогеологических работ по оценке эксплуатационных запасов подземных вод, выполненных ИВПС КарНЦ и другими организациями на отдельных участках бассейна Онежского озера (Пряжа, Эссойла, Деревянное, Поросозеро, Суоярви, Петрозаводск, Повенец, Челмужи, Мелиоративный). Гидрогеологические параметры, необходимые для расчета расхода подземного потока, рассчитывались по данным опытных откачек. Для прибрежной территории Онежского озера построены гидродинамические карты (водопроницаемости, гидроизогипс). При расчете потока параметры не осреднялись в пределах значительных площадей, а снимались с соответствующих карт. В пределах основных водоносных комплексов побережья озер выделен ряд расчетных участков со сходными

гидрогеологическими условиями. В пределах участков расходы потоков подземных вод, направленных непосредственно в озеро, минуя речную сеть, рассчитаны по основной зависимости Дарси.

Оценка выноса в озера растворенных веществ производилась на основе полученных значений расходов подземных вод и сведений об их химическом составе. Анализ гидрогеохимических данных на исследованной территории, использованных для построения карты минерализации подземных вод, включал результаты опробования 1500 водопунктов (родники, скважины, колодцы). По ряду источников имеются многолетние наблюдения. Большинство анализов проб воды выполнены в аккредитованной химической лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН по аттестованным методикам [Ефременко, 2007].

В данной статье обобщены результаты оценки подземного стока в Онежское озеро и некоторые озера бассейна р. Шуи (Сямозеро, Крошнозеро, Суоярви, Пряжинское), различные по гидрологическим характеристикам [Лифшиц, 1970; Бассейны рек..., 1986] и антропогенной нагрузке (табл. 1). Онежское озеро – второе по величине озеро Европы. Основная часть его котловины заполнена чистыми олиготрофными водами. Однако некоторые губы (Кондопожская, Петрозаводская, Большая) загрязнены сточными водами промцентров. Водосборы озер Сямозеро, Крошнозеро, Пряжинское в бассейне р. Шуи наиболее освоены. Озера используются для водоснабжения, рекреации, рыбного промысла и выращивания форели. Воды озер маломинерализованны – сумма ионов составляет 20–40 мг/л и слабо изменяется по акватории и глубине озер. По уровню трофии водоемы, согласно классификации С. П. Китаева (1984), относятся к мезотрофному типу, а оз. Крошнозеро (в отдельных участках) – к эвтрофному.

Таблица 1. Морфометрические характеристики озер

Озеро	Площадь, км ²		Глубина, м		Объем воды, км ³	Ширина фронта потока подземных вод, км (доля загрязненного стока, %)
	водосбора	зеркала	средняя	макс.		
Онежское	57 300	9840	30	127	295	1725 (14)
Сямозеро	1610	266	6,7	24,5	1,79	140 (20)
Суоярви	2087	61	4,7	26,0	0,285	93 (14)
Крошнозеро	187	9	5,7	12,6	0,05	23 (35)
Пряжинское	50	3,7	4,1	7,5	0,015	11 (44)

Условия формирования подземного стока на водосборе Онежского озера

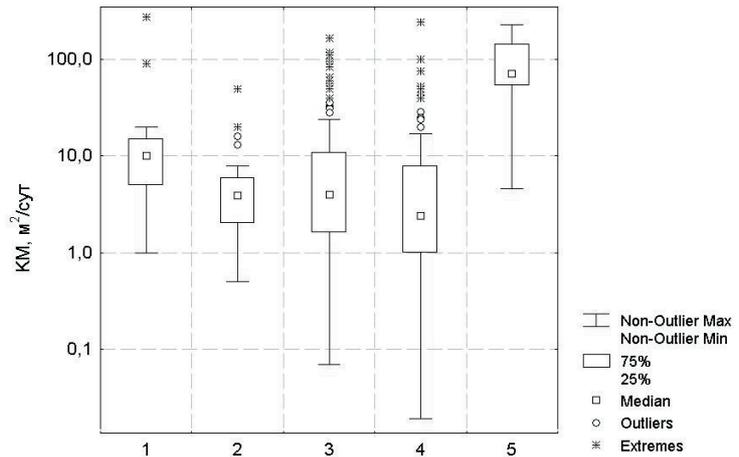
Водосборная территория Онежского озера расположена в восточной части Балтийского щита на границе с Русской плитой. Сложность геологического строения района Онежского озера определяется его расположением в краевой части Балтийского щита и развитием разных по строению и времени образования тектонических структур. В строении щита принимают участие архейские и протерозойские породы кристаллического фундамента и рыхлые четвертичные отложения. В южной части бассейна распространены породы осадочного чехла Русской платформы, сложенного породами верхнего девона и нижнего карбона.

В пределах Балтийского бассейна трещинных вод основной водоносный горизонт, имеющий повсеместное распространение, залегает в верхней трещиноватой зоне кристаллических пород. Практически на всей территории развиты поровые грунтовые воды рыхлых отложений четвертичного покрова. Наиболее интенсивная трещиноватость кристаллических пород отмечается до глубин 30–40 м, глубже породы становятся слаботрещинноватыми. В зонах тектонических нарушений глубина распространения трещиноватости увеличивается до 100–150 м. Фильтрационные свойства трещиноватых пород изменчивы и, как правило, низкие. Водопроницаемость архейских и нижнепротерозойский пород одного порядка (в среднем 2–5 м²/сут), несколько выше средние значения осадочных пород палеозоя (10 м²/сут), а максимальные величины (в среднем 80 м²/сут) характерны для гдовского водоносного горизонта (рис. 1). Высокие значения водопроницаемости встречаются в пределах всех комплексов и объясняются характером перекрывающих четвертичных отложений, которые играют ведущую роль в формировании подземного стока на кристаллическом массиве.

Подземные воды всех типов четвертичных отложений гидравлически тесно связаны между собой и с трещинными водами кристаллических пород. Высокое значение модулей подземного стока характерно для территорий, которые сложены песчаными, главным образом флювиогляциальными (озовыми) и озерноледниковыми отложениями мощностью 10 и более метров. Такие образования встречаются в Заонежье, на побережье Повенецкого залива и в среднем течении р. Шуи в областях развития краевых ледниковых образований. На участках, где кристаллические породы непосредственно перекрыты обводненными флю-

Рис. 1. Распределение величин водопроницаемости пород различных комплексов в пределах водосборной площади Онежского озера:

1 – осадочные породы палеозоя; 2 – нижнепротерозойский комплекс верхнего карелия; 3 – нижнепротерозойский комплекс нижнего и среднего карелия; 4 – комплекс гранито-гнейсов; 5 – верхнепротерозойский комплекс



виогляциальными или озерно-ледниковыми отложениями (не мореной) даже небольшой мощности, водопритоки в скважины из трещиноватых пород заметно увеличиваются. Работы по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод в отложениях водно-ледникового комплекса на территории Карелии показали, что водопроницаемость флювиогляциальных отложений на 1–2 порядка выше, чем кристаллических, и достигает 200–1000 м²/сут [Бородулина и др., 2006].

Подземные воды на кристаллическом щите, как правило, безнапорные, и только в местах, где в разрезе четвертичного покрова присутствуют глинистые фракции, воды приобретают напор. Повсеместно напорными являются воды осадочного комплекса Русской платформы. Питание подземных вод осуществляется полностью за счет инфильтрации атмосферных осадков, величина которой составляет обычно 70–100 мм/год [Иешина и др., 1987]. Среднегодовая величина инфильтрации в песчаных отложениях достигает 560 мм/год [Soveri, 1985].

Общие гидрогеологические условия открытого кристаллического массива, характеризующегося отсутствием региональных водоупоров, определяют довольно простую схему движения подземных вод для всех комплексов водовмещающих пород. Водосборы поверхностных и подземных вод совпадают, движение подземных вод направлено от водоразделов к ближайшим поверхностным водотокам и водоемам, где происходит их разгрузка. Родниковый сток в прибрежной зоне исследованных озер незначительный, на побережье Онежского озера зафиксировано лишь 15 родников с дебитами 1–10 л/с. Высокодебитные родники в Карелии единичны. Так, в бассейне р. Шуи на южном берегу оз. Крошнозеро известен родник с дебитом около 100 л/с, вскрывающий водоносный межморенный онегозерский горизонт.

Подземным водам Карелии свойственна в целом невысокая минерализация (как правило, менее 1 г/л), более минерализованные воды приурочены к зонам замедленного водообмена или связаны с особенностями тектонического строения. Бассейн Онежского озера характеризуется наиболее контрастным проявлением подземных вод различной минерализации и химического состава (рис. 2). В качестве основного фактора, определяющего количество растворенных солей в подземных водах, выступает водообмен, при уменьшении интенсивности которого возрастает время взаимодействия в системе порода – вода. В соответствии с соподчиненностью основных факторов выявляется региональная вертикальная и горизонтальная зональность, определяющая увеличение минерализации подземных вод с глубиной и по мере уменьшения степени расчлененности рельефа. Минимальные величины минерализации типичны для вод гранито-гнейсовых полей Западно-Карельской возвышенности, где в силу особенностей рельефа, характеризующегося грядовым типом и слабым развитием моренных равнин, создаются наиболее промывные условия. Самые минерализованные воды приурочены к породам Онежской структуры и юго-восточной части бассейна озера. Здесь скважинами вскрываются хлоридно-натриевые воды с минерализацией более 1 г/л, максимальные значения (до 10 г/л) отмечены в осадочных породах палеозоя. На Заонежском полуострове существует родник «Соляная яма» – единственный известный в Карелии естественный очаг разгрузки соленых (до 4 г/л) хлоридно-натриевых подземных вод. Разгрузка напорных минерализованных вод, по-видимому, связана с одной из надразломных зон складчато-разрывных дислокаций. Влияние подземных вод на гидрохимический режим рек этого района проявляется в изменении в меженный период

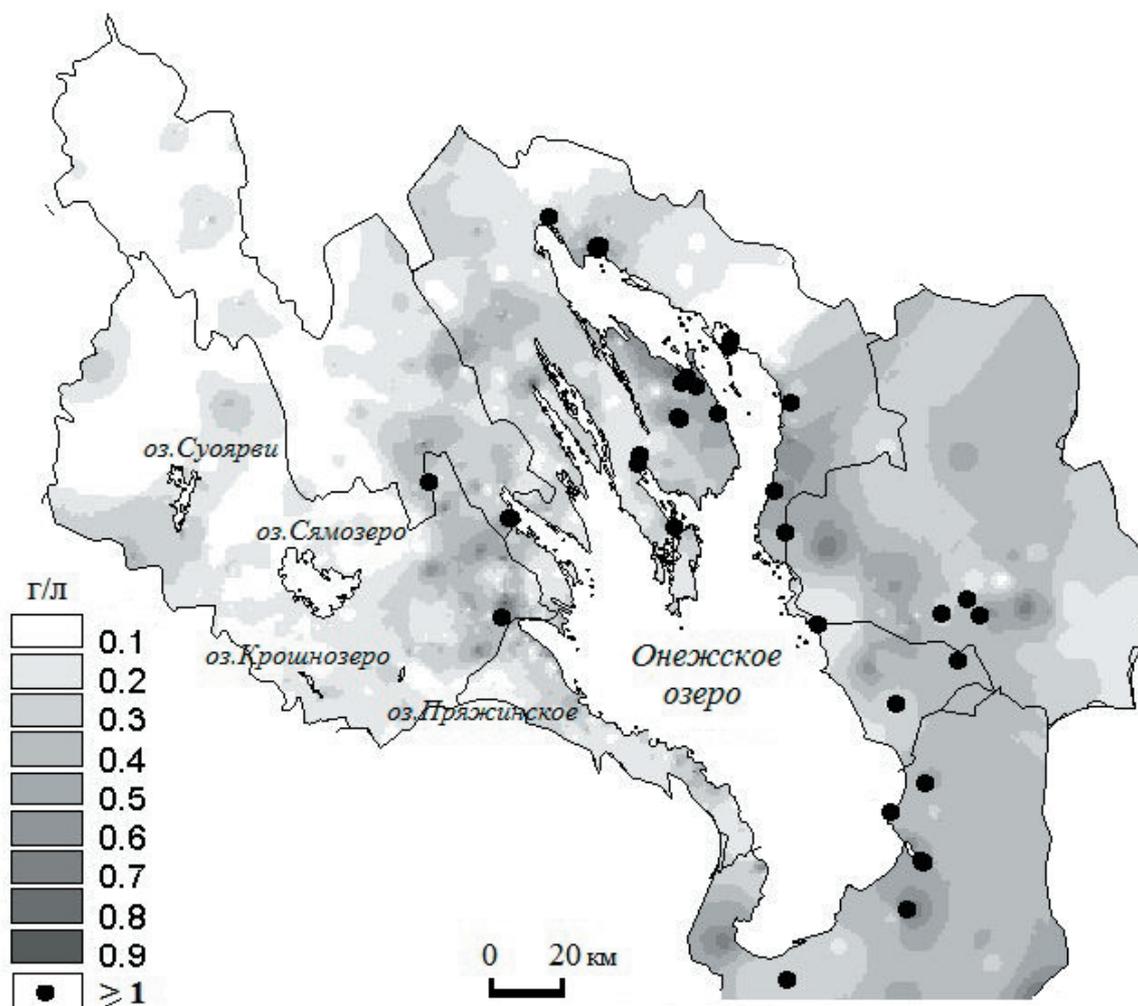


Рис. 2. Распределение величины общей минерализации на водосборной территории Онежского озера

типа воды с гидрокарбонатно-кальциевого на хлоридно-натриевый, как это наблюдалось в р. Антоновщина [Лозовик и др., 2005]. Свидетельством в пользу существования напорных соленых вод может служить новая информация о разрезе карельских образований Онежской структуры, включающих мощную толщу каменных солей ятулия [Куликова, 2010].

В Карелии преобладающим типом подземных вод является гидрокарбонатно-кальциевый, но встречаются гидрокарбонатно-натриевые (содовые), гидрокарбонатно-магниевые, сульфатные и хлоридные воды. Попытки связать состав подземных вод с составом вмещающих пород не привели к ожидаемым результатам [Гидрогеология СССР, 1977]. Одинаковые по минерализации и составу подземные воды формируются в различных по составу породах и наоборот. Исключением являются сульфатные воды, связанные с интенсивной сульфидизацией пород, и хлоридно-натриевые воды повышенной минерализации, приуроченные к осадочным породам.

Основным фактором, определяющим количество растворенных солей в подземных водах, выступает водообмен. Гидрокарбонатно-кальциевые воды формируются независимо от состава пород в зоне активного водообмена. В условиях слабого водообмена в породах различного состава (базальтах, доломитах, кварцито-песчаниках и др.) нередко образуется щелочная вода с низкими концентрациями кальция и магния при подавляющем преобладании гидрокарбонатов и натрия. В соответствии с представлениями С. Л. Шварцева [1998], формирование содовых вод (тех, которые насыщены кальцитом, а не любых, в которых $[HCO_3^-] > [Ca + Mg]$) – естественное следствие взаимодействия вод с алюмосиликатными породами, и связано оно с определенной стадией эволюции подземных вод. Таким образом, в рассматриваемые озера разгружается подземная вода не только разной минерализации, но и различного состава. Следует подчеркнуть, что подземные воды на территории населенных пунктов подвержены загрязнению, преимущественно хозяйственно-

бытовому, которое выражается, прежде всего, в увеличении концентраций нитратов [Лозовик, Бородулина, 2009]. Если основными биогенными элементами, поступающими с речным стоком в озеро, являются кремний, железо и азот органический, то с подземным – нитраты.

Подземный водный и химический сток в озера

При расчете подземного стока принято допущение, что приток подземных вод в озера Сямозеро, Крошнозеро и Пряжинское формируется в основном в ледниковых и водно-ледниковых отложениях четвертичного возраста, а приток в оз. Суоярви – из верхней трещиноватой зоны пород архея. На побережье Онежского озера главные водоносные комплексы, формирующие подземную составляющую водного баланса озера, – комплекс четвертичных отложений, кристаллических пород Балтийского щита и комплекс осадочного чехла Русской платформы. В пределах главных комплексов, в первом приближении совпадающих с основными геологическими структурами побережья, с учетом характера четвертичного покрова и степени расчлененности рельефа выделены 11 расчетных участков береговой зоны со сходными гидрогеологическими условиями. В пределах участков рассчитаны расходы потоков подземных вод, направленных непосредственно в озеро, минуя речную сеть (рис. 3).

Общий подземный сток в Онежское озеро оценен в 0,14 км³/год. Основной объем подземного стока формируется в пределах участков 2–6, сложенных нижнепротерозойскими породами, обрамляющими заливы в северной и северо-западной частях Онежского озера. Наименьший объем поступает из пород архейского возраста с восточного побережья озера. Основной объем подземных вод в озера Сямозеро, Крошнозеро и Пряжинское поступает из песчаных водно-ледниковых отложений. Данные по речному притоку в озера взяты из работ [Поверхностные воды..., 1991; Потапова, Лозовик, 2007; Потапова и др., 2007].

Результаты расчета водного и ионного притока подземных вод в озера свидетельствуют о том, что подземный сток непосредственно в озера (минуя речную сеть) по сравнению с речным в целом невелик, хотя и выражается различной величиной – от менее 1 % (Онежское озеро и оз. Суоярви) до 23 % (оз. Пряжинское) (табл. 2). В то же время доля подземного ионного стока в озера по отношению к речному более существенна и составляет 8 % (Онежское озеро и оз. Суоярви) и 30–40 % (Крошнозеро, Сямозеро).

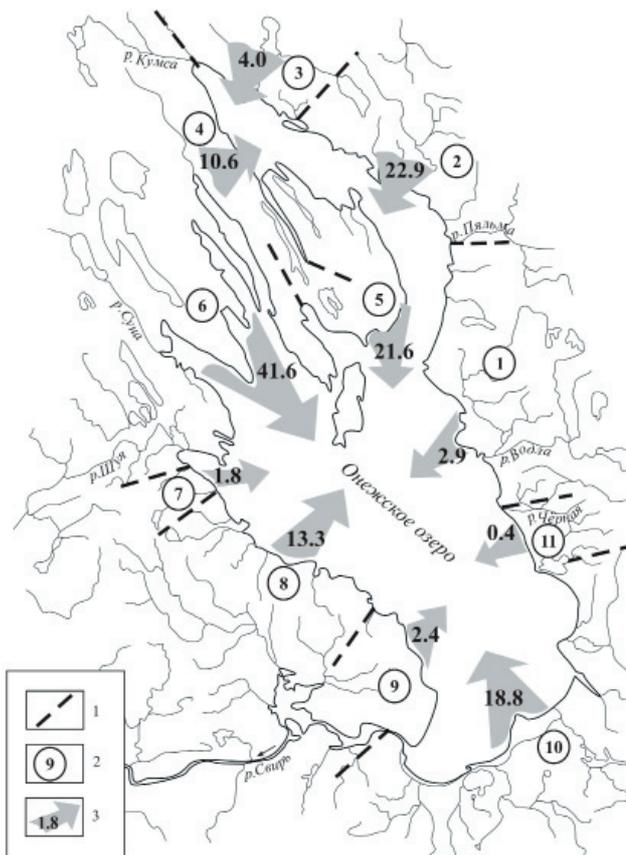


Рис. 3. Объемы подземного стока с расчетных участков побережья Онежского озера:

1 – границы расчетных участков; 2 – номера участков; 3 – объемы стока (млн м³/год)

зоро). Подземный ионный сток в Пряжинское озеро превышает поверхностный. Такая большая величина объяснима высокой антропогенной нагрузкой в прибрежной части озера, где населенная территория составляет почти половину зоны непосредственного подземного стока в озеро (табл. 1). Причем ионный сток включает только сумму консервативных элементов без учета биогенных.

Таблица 2. Водный и ионный сток в озера

Озеро	Водный сток, млн м ³ /год		Ионный сток, тыс. т	
	Речной	Подземный	Речной	Подземный
Онежское	16 800	140,3	635,0	45,3
Суоярви	702	2,7	7,5	0,6
Сямозеро	372	41,3	8,2	3,4
Крошнозеро	61,4	7,4	2,5	0,8
Пряжинское	13,3	3,1	0,17	0,24

Полученные результаты расчета водного и химического подземного стока и современные данные о химическом составе атмосферных осадков [Потапова, Лозовик, 2007] позволили уточнить химический баланс ионного стока и основных биогенных элементов для Онежского озера и Крошнозеро. В работах [Сабы-

Таблица 3. Химический баланс Онежского озера

Элементы баланса	Водный сток, км ³	Ионный сток, тыс. т	N-NO ₃ , т	P _{общ} , т	Si, т
Речной приток	16,8	635,0	706	504	28 360
Атмосферные осадки	5,5	11,0	2052	61	1000
Сточные воды	0,1	20,0	–	174	–
Подземный приток	0,14	45,3	68,5	8	701
Всего приход	20,76	711,3	2825,5	747	30 062
Сток из озера	18,6	718,0	4092	230	5005
Невязка, %		1	32	69	83

Таблица 4. Химический баланс оз. Крошнозеро

Элементы баланса	Водный сток, млн м ³	Ионный сток, т	N-NO ₃ , т	P _{общ} , т	Si, т
Речной приток	61,36	2487	16,4	6,9	219
Атмосферные осадки	6,68	13	0,7	0,1	1,2
Сточные воды	0,01	4	–	0,1	–
Подземные	7,4	776	22	2	47
Всего приход	75,45	3280	39,1	9,1	247,2
Сток из озера	70,56	3127	14,1	3	51,1
Невязка, %		5	64	67	79

лина, 1991, 2007] подземная составляющая в химическом балансе озер не учитывалась, чем и объяснялась невязка по ионному притоку и стоку. Количественный расчет подземного стока практически полностью сбалансировал поступление и вынос консервативных элементов (табл. 3, 4). Невязка баланса фосфора и кремния (превышение притока над стоком) сохраняется и с учетом подземной составляющей. Она обусловлена внутриводоемными процессами трансформации фосфора и кремния (седиментацией, потреблением планктоном, захоронением в донных отложениях). Невязка баланса нитратов в оз. Крошнозеро объяснима их активным потреблением в этом эвтрофном озере. В Онежском озере, наоборот, приход нитратов меньше, чем их сток. Это связано с особенностями круговорота азота в больших стратифицированных водоемах [см. ст. П. А. Лозовика и др. в наст. номере].

На долю подземного стока в приходной части ионного баланса Онежского озера приходится 6 %, в балансе биогенных элементов – 1–3 %. Роль подземного химического стока в оз. Крошнозеро значительно выше. Здесь на долю подземной составляющей в балансе главных ионов приходится 24 %, с подземными водами поступает 56 % нитратов, 22 % фосфора, 19 % кремния от общего поступления.

Таким образом, несмотря на относительно небольшое количество подземных вод, поступающих непосредственно в озера, их влияние на ионный состав более значимо и нередко сравнимо с воздействием, оказываемым поверхностными водами. Наиболее важна роль прямого подземного стока в химическом ба-

лансе небольших озер с высокой антропогенной нагрузкой в прибрежной зоне, загрязненный подземный сток с которой значительно увеличивает поступление всех компонентов и особенно нитратную нагрузку на водоем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-05-98801-р_север_a). Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ и В. В. Тренину за оказанную помощь в подготовке статьи.

Литература

- Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер / Государственный водный кадастр. Т. 1. РСФСР. Вып. 5. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 688 с.*
- Бородулина Г. С., Богачев М. А., Филатов Н. Н. Результаты гидрогеологических исследований и перспективы использования вод из четвертичных отложений // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества. Петрозаводск; Куопио: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 144–161.*
- Всеволожский В. А., Кочеткова Р. Н. Подземный сток Карелии // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 4. С. 389–399.*
- Гидрогеология СССР. Сводный том, вып. 3. М., 1977. 216 с.*
- Джамалов Р. Г., Зекцер И. С., Мехетели А. В. Подземный сток в моря и мировой океан. М.: Наука, 1977. 94 с.*
- Ефременко Н. А. Методы отбора и химического анализа проб воды // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 10–12.*
- Зекцер И. С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 328 с.*

Зекцер И. С., Джамалов Р. Г. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. М.: Наука, 1989. 123 с.

Зекцер И. С., Ковальский Л. Б. Гидрогеологические условия формирования подземного стока в реки на территории Карело-Кольского региона // Вестник Московского ун-та. 1963. № 5.

Иешина А. В., Поленов И. К., Богачев М. А. и др. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 151 с.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М., 1984. 207 с.

Куликова В. В. Палеопротерозойские вулканы центральной Карелии и модели их образования (новый взгляд) // Литосфера. 2010. № 3. С. 118–127.

Лифшиц В. Х. Физико-географическая характеристика бассейна и режим стока реки Шуи (притока Онежского озера) // Водные ресурсы Карелии и пути их использования. Петрозаводск, 1970. С. 235–276.

Лозовик П. А., Басов М. И., Зобков М. Б. Поверхностные воды Заонежского полуострова, химический состав воды // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. С. 35–47.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.

Лось Е. И. Некоторые закономерности формирования подземного стока Карелии (на примере озерно-речной системы Шуи) // Водные ресурсы. 1977. № 1. С. 106–118.

Малявкин А. Н. Подземное питание рек Карелии. Петрозаводск, 1966. 112 с.

Небожева Н. П. Оценка подземного стока в реки Кольского полуострова и Карелии // Тр. ГГИ. 1965. Вып. 122. С. 67–81.

Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. 211 с.

Поленов И. К., Иешина А. В. Сток подземных вод в Петрозаводскую губу Онежского озера // Петроза-

водская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 156–159.

Поленов И. К., Устинов Г. Н. Оценка подземного питания рек Карелии методом расчленения их гидрографов // Сб. работ по гидрологии. Л., 1980. № 15. С. 53–61.

Потапова И. Ю., Лозовик П. А. Характеристика химического состава атмосферных осадков и химических выпадений на территории Карелии // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 174–187.

Потапова И. Ю., Белкина Н. А., Бородулина Г. С. и др. Гидрохимические исследования озера Пряжинского // Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 123–134.

Пряхин А. И. Региональные гидрогеологические особенности Карелии // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1972. Т. 47, № 2. С. 124–131.

Сабылина А. В. Химический баланс оз. Крошнозеро и биогенная нагрузка // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. С. 156–161.

Сабылина А. В. Внешняя нагрузка на Онежское озеро // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 19–21.

Шабалина М. А., Воронов А. Н. Роль подземных вод в водном балансе Ладожского озера // VI Всероссийский гидрологический съезд: Тез. докл. СПб., 2004. С. 63–65.

Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.

Zektser I. S., Dzhamalov R. G., Everett L. G. Submarine groundwater. Atlanta, USA: CRC Press, 2006. P. 466.

Soveri J. Influence of meltwater on the amount and composition of groundwater in Quaternary deposits in Finland // National Board of Waters. N 63. Helsinki (Finland), 1985. P. 92.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru
тел.: (8142) 576541

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 349.6: 639.2/.3

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЫБОЛОВСТВА

О. Я. Глибко¹, А. А. Лукин², Б. Ф. Прищепа³

¹ Карельское отделение ФГНУ «ГосНИОРХ»

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН;
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН

³ ФГУП «ПИНРО»

В статье дается анализ развития и становления современного законодательства о рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов с середины прошлого века по настоящее время. Дается характеристика основных источников законодательства. Анализируются достоинства и недостатки нормативно-правового регулирования рыболовства и перспективы его оптимизации.

Ключевые слова: водные биологические ресурсы, законодательство, рыболовство, охрана, оптимизация.

O. Ya. Glibko, A. A. Lukin, B. F. Prishchepa. MODERN PROBLEMS OF FISHERY REGULATION BY LAWS AND STANDARDS

The paper describes the formation of modern legislation on fishery and preservation of water biological resources from the middle of the past century onwards. The basic sources of the legislation are characterized. Merits and flaws of the laws and standards regulating fishery and the prospects of their optimization are analyzed.

Key words: water biological resources, legislation, fishery, protection, optimization.

Введение

Водные биологические ресурсы в историческом, экономическом и социальном аспектах являются фактором благосостояния и развития России, а для населения многих территорий – фактором выживания.

Решение существенной части проблем, стоящих сегодня перед рыбной отраслью, связано, прежде всего, с разработкой нормативно-правовой базы, на основе которой возможно построение эффективной в экологическом и экономическом отношениях системы управления водными биоресурсами. Однако попытки совершенствования действующего законодательства зачастую оказываются неэффективными, поскольку не учитывают исторические и

социальные факторы, современное состояние биоресурсов.

Целью настоящей работы было исследование становления современного законодательства РФ о рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов (ВБР).

В рамках поставленной цели решались следующие задачи: а) охарактеризовать современное состояние законодательства о рыболовстве, б) выявить основные достоинства и недостатки законодательства, в) проанализировать перспективы эволюции законодательства и оптимизации системы рыболовства.

Отечественный опыт использования и охраны природных ресурсов представляет уникальный материал, который может и должен быть использован при создании концептуальной и

методологической основой системы рыбного хозяйства в России.

Становление законодательства о рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов

Законодательство о водных биологических ресурсах как самостоятельная отрасль законодательства в России возникла достаточно поздно.

В первые годы советской власти регулирование в сфере рыболовства сводилось к упорядочению системы добычи ВБР, а их охране практически не уделялось внимания. Системные меры, направленные на сохранение и восстановление численности водных животных, принимаются только начиная с середины 1950-х гг. Одним из первых таких актов стало Постановление СМ СССР от 15 сентября 1958 г. № 1045 «О воспроизводстве и охране рыбных запасов во внутренних водоемах СССР», действующее до сих пор. Оно обязало Совет Министров РСФСР обеспечить разработку и применение типовых рыбозащитных сооружений для предотвращения засасывания молоди промысловых рыб насосными установками и оросительными системами, запрещало строительство гидротехнических сооружений и насосных установок на рыбохозяйственных водоемах без проведения согласованных с органами рыбоохраны мероприятий по сохранению и воспроизводству рыбных запасов в этих водоемах, а также утвердило «Положение об охране рыбных запасов и о регулировании рыболовства в водоемах СССР».

Вплоть до начала 2000-х гг. нормативно-правовое регулирование в области рыболовства носило в основном подзаконный характер при большом количестве советских нормативных актов. Например, и сегодня сохраняет действие Положение о любительском и спортивном рыболовстве (Приказ Минрыбхоза СССР от 7 апреля 1982 г. № 139).

В 2000-е гг. ситуация стала выправляться. Президент и Правительство Российской Федерации приняли ряд нормативных документов, таких как Морская доктрина РФ на период до 2020 г. (2001), Концепция развития рыбного хозяйства РФ на период до 2020 г. (2003) и др. – декларативных по своей сути, но задающих определенное направление для развития рыбной отрасли. Подобные документы разрабатывались также научными и общественными кругами, например, Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России (принята на Национальном Форуме по сохранению био-

разнообразия 05.06.2001). Основными задачами в рамках стратегии являются: создание и совершенствование нормативно-правовой базы; разработка стратегии комплексного использования биоресурсов на экосистемной основе; обеспечение условий сохранения восстановительного потенциала для популяций отдельных ресурсных видов, сообществ, экосистем; переход от экстенсивной к интенсивной стратегии биоресурсопользования.

Упорядочению отношений в отрасли немало способствовало и вступление в силу Федерального закона «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» (далее – закон о рыболовстве). Необходимо отметить долгую историю принятия данного закона – более 10 лет. Затягивали законотворческий процесс лоббирование интересов хозяйствующих субъектов, споры законодательных и исполнительных органов, многочисленные дискуссии в научных и общественных кругах.

Первый законопроект был подготовлен еще в 1993 г. Но интенсивная работа над законом началась после принятия в 1995 г. закона о животном мире. Проект № 96700125-2 закона «О рыболовстве и охране водных биоресурсов» был представлен в июле 1996 г. Он был объемным (111 распространенных статей), имел отличающуюся от современного закона структуру, закреплял ряд новых терминов и давал новую трактовку старым (право собственности на ВБР, рыбохозяйственные водоемы, такие виды пользования, как аренда, кратковременное и безвозмездное пользование). В проекте подробно изложены положения о государственном управлении и системе уполномоченных государственных органов, о лицензировании промысла и рыбоводства, о видах пользования ВБР, о видах платежей и их распределении, льготах пользователям биоресурсами, об ответственности и др. Предлагались новые институты: государственная рыбохозяйственная экспертиза, ихтиопатологический контроль.

Ввиду большого количества противоречий проекта с нормами налогового, бюджетного, административного законодательства Российской Федерации он был отклонен парламентом летом 1997 г.

Представленный в Государственную Думу РФ в июле 2000 г. проект закона «О рыболовстве и охране водных биоресурсов» был значительно сокращен (до 97 статей), из него были изъяты положения об ихтиопатологическом контроле, о собственности на ВБР. В то же время увеличено количество определений терминов (до 32, притом что в первом проекте их было 13, а в принятом законе осталось 19), расширен

перечень оснований возникновения права пользования, установлены требования к различным видам хозяйственной деятельности. Нововведения – институт общественной охраны ВБР, Целевой бюджетный Фонд управления, изучения сохранения и воспроизводства ВБР.

Указанный проект уже в ранге Федерально-го закона был принят Государственной Думой 19 июля 2000 г., но отклонен Советом Федерации с предложением о создании согласительной комиссии 26 июля (№ 228-СФ). В Заключении Комитета Совета Федерации по делам Севера и малочисленных народов отмечался ряд недостатков законопроекта. Разногласия возникли в отношении права собственности на ВБР и связанного с этим порядка предоставления их в пользование. В частности, предлагалось передать полномочия по распоряжению ВБР, находящимися в собственности субъектов Федерации, региональным органам власти (ст. 28), а также отнести биоресурсы внутренних морских вод и территориального моря к собственности субъектов РФ, что способствовало бы более быстрому их освоению, с одновременной ответственностью субъектов РФ за сохранение и управление этими водными биоресурсами (ст. 23 проекта). Также отмечалось несоответствие между бассейновым и территориальными принципами в управлении ВБР (статьи 18, 21 и др.); нечеткое определение порядка утверждения общих допустимых уловов и квот добычи (вылова) биоресурсов (ст. 59). Из числа участников правоотношений, регулируемых законом, в противоречие закону «Об охране окружающей среды» были исключены граждане и общественные организации – не пользователи ВБР. Также законопроект по ряду положений противоречил Налоговому и Бюджетному кодексам РФ.

Проект в редакции согласительной комиссии (март 2001 г.) был несколько сокращен, из него были изъяты отдельные положения (например, об общественной охране). Но далеко не все замечания и предложения Комитета Совета Федерации были учтены. Проект отличали все те же недостатки: излишняя «загруженность», декларативность и повторяемость норм, противоречие с нормами гражданского, бюджетного, налогового законодательства, закона о лицензировании видов деятельности и даже Конституции РФ. В результате закон не был принят.

Принятый в декабре 2004 г. закон носил компромиссный характер. «По ряду позиций он просто закрепляет статус-кво, а по всем спорным вопросам отсылает к постановлениям Правительства РФ» [Арсюхин, 2004], а также к федеральным законам, международным до-

говорам, решениям исполнительных органов власти. Так, ст. 12 «Ограничение права пользования водными биоресурсами» как нельзя лаконична: «Право пользования водными биоресурсами может быть ограничено в соответствии с федеральными законами и международными договорами Российской Федерации».

Современное законодательство о рыболовстве и сохранении ВБР

Законодательство о рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов, как и в советское время, выступает как составная часть законодательства о животном мире.

К основным источникам законодательства относят Конституцию Российской Федерации от 12 декабря 1993 г., Федеральный закон от 24 апреля 1995 г. № 52-ФЗ «О животном мире», Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и специализированный Федеральный закон от 20.12.2004 № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов».

Принятая всенародным голосованием в 1993 г. Конституция Российской Федерации в статье 9 определила, что земля и природные ресурсы могут находиться в частной, государственной, муниципальной и иных формах собственности. Часть вторая ст. 36 говорит о том, что «владение, пользование и распоряжение землей и другими природными ресурсами осуществляются их собственниками свободно, если это не наносит ущерба окружающей среде и не нарушает прав и законных интересов иных лиц». Ст. 42 гарантирует каждому право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением. В ст. 58 установлена обязанность каждого сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам. В соответствии с п. «д» части первой ст. 72 природопользование и охрана окружающей среды находятся в совместном ведении Российской Федерации и субъектов Федерации.

В 1995 г. был принят *Федеральный закон «О животном мире»*. Он является законом общего характера; устанавливает основные понятия законодательства (животный мир, объекты животного мира, использование и охрана объектов животного мира и др.; ст. 1), право собственности на объекты животного мира (ст. 4), полномочия органов государственной власти и местного самоуправления (статьи 6–8), управление, контроль, мониторинг, нормирование,

охрана, пользование животным миром (глава 5), порядок получения лицензий и их виды, виды пользования животным миром, права и обязанности пользователей, ответственность за нарушение законодательства.

В 2002 г. вступил в силу новый *Федеральный закон «Об охране окружающей среды»*. Он ввел понятия природных ресурсов и их использования, нормативов допустимого воздействия и допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду, требований и контроля в области охраны окружающей среды, экологического мониторинга, вреда окружающей среде и др. (ст. 1), установил принципы охраны окружающей среды (ст. 3), в том числе: а) охрана, воспроизводство и рациональное использование природных ресурсов как необходимые условия обеспечения благоприятной окружающей среды и экологической безопасности; б) платность природопользования и возмещения вреда окружающей среде; в) презумпция экологической опасности планируемой хозяйственной и иной деятельности; г) сохранение биоразнообразия и др.

В главе 7 закона (статьи 34–56) установлены требования в области охраны окружающей среды при осуществлении хозяйственной и иной деятельности.

Принятый в декабре 2004 г. *Федеральный закон «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов»* призван развить положения закона о животном мире в отношении живых ресурсов водных объектов. В законе 7 глав и 53 статьи. Первая глава, по установившимся правилам законотворческой техники, содержит общие положения: понятия, принципы, участники и объекты отношений, содержание и сфера действия законодательства. Важным моментом стало отнесение к участникам правоотношений всех граждан, даже не являющихся пользователями ВБР (чего не было в описанных выше законопроектах). Эта норма закреплена на уровне принципа законодательства (п. 5 ст. 3).

В главе 2 определены основные права на водные биоресурсы: право собственности и право пользования. Право собственности на биоресурсы (ст. 10) в законе справедливо связано с правом собственности на водный объект и в этой связи соответствует нормам водного законодательства. Все водные биоресурсы, за исключением биоресурсов обособленных водных объектов, таким образом, находятся в федеральной собственности.

Обширная третья глава посвящена рыболовству (объекты и виды рыболовства, ограничения рыболовства, общие допустимые уловы, квоты добычи и их распределение). Важным

моментом явилось положение о закреплении за пользователями биоресурсами в целях промышленного рыболовства на срок не менее пяти лет «долей в общем объеме квот добычи (вылова) водных биоресурсов, определенных на основании данных об объеме добытых (выловленных) ими водных биоресурсов за предыдущие пять лет» (часть первая ст. 31). Квоты на вновь вводимые в пользование биоресурсы, а также изъятые квоты подлежат продаже на аукционах (ст. 38).

Законом введено понятие рыбопромыслового участка (ст. 18). Договоры пользования рыбопромысловыми участками заключаются на конкурсной основе (ст. 41), за исключением заключения договоров с лицами, относящимися к коренным малочисленным народам Севера, Сибири и Дальнего Востока РФ, или их общинами (часть вторая ст. 39).

Отдельная глава закона (глава 6) посвящена вопросам сохранения водных биоресурсов и среды их обитания. Важным положением здесь было то, что при осуществлении любых видов работ должно учитываться их возможное влияние на состояние водных биоресурсов и среду их обитания (часть первая ст. 50).

С 2005 г. началась усиленная работа по формированию нормативно-правового обеспечения законодательства о рыболовстве, которая продолжается до сих пор. В развитие закона был принят целый ряд документов. Так, в 2005 г. приняты «Типовые правила рыболовства», в соответствии с которыми затем принимались правила рыболовства для каждого рыбохозяйственного бассейна. В августе 2008 г. Правительство РФ утвердило «Правила образования рыбохозяйственных заповедных зон», а также определило, какой размер ущерба водным биоресурсам следует считать крупным, что имело большое правоприменительное значение; в октябре утвердило «Правила установления рыбоохранных зон», а в декабре того же года – «Правила организации и проведения конкурса на право заключения договора о предоставлении рыбопромыслового участка для организации любительского и спортивного рыболовства». Приказами Росрыболовства утверждаются перечень анадромных рыб (Приказ от 26.02.2009 № 147), перечень видов биоресурсов, в отношении которых устанавливается общий допустимый улов (в последней редакции был утвержден в сентябре 2009 г.). В марте 2009 г. Росрыболовством утвержден «Перечень особо ценных и ценных видов водных биоресурсов, отнесенных к объектам рыболовства».

Одновременно шла работа по совершенствованию принятого закона о рыболовстве.

Однако порой изменения, вносимые в закон, скорее ухудшали, чем улучшали, положение рыбозаготовительных организаций и снижали заложенные в первоначальном законе возможности эффективного регулирования отношений в сфере рыболовства.

Недостатки действующего законодательства о рыболовстве

Упорядочения отношений в сфере рыболовства с введением в действие закона о рыболовстве не произошло. Как уже отмечалось, все спорные и насущные вопросы в законе были отданы на уровень подзаконного регулирования или заменялись отсылочными нормами (отсылают к положениям гражданского, водного и других отраслей законодательства). Более 80 % статей закона содержат отсылочные нормы. С одной стороны, это дало возможность более гибкого решения многих вопросов (через акты правительства и специально уполномоченного органа в области рыболовства), с другой – снова затянуло урегулирование ряда важных вопросов на неопределенный срок.

Многие ожидания рыболовов и экологов, которые возлагались на этот закон, не оправдались. Закон заложил основы для устойчивого развития российского рыбохозяйственного комплекса, но не решил вопросов контроля за выловом, не снял проблемы «сырьевого» характера морского рыболовства, когда рыбаки вынуждены сдавать пойманную рыбу в порты других стран (Норвегия, Китай, Япония), стимулируя зарубежную рыбоперерабатывающую промышленность.

По словам Станислава Ильёсова, руководителя Государственного комитета РФ по рыболовству в 2004–2007 гг., принятие закона должно было положить конец хищническому лову рыбы и браконьерству. Однако при этом про браконьерство в законе не говорится ни слова. Действенных механизмов контроля за рыбозаготовителями и стимулирования их к соблюдению законодательства предложено не было [Арсюхин, 2004].

Много вопросов вызвал механизм распределения квот между пользователями водных биоресурсов, а также сроки, на которые квоты выдаются. Не всеми принят конкурсный механизм распределения рыбопромысловых участков. Рыбаки опасаются, что таким образом могут быть не учтены интересы местных рыбохозяйственников, традиционных рыболовецких общин, объединений, ассоциаций рыбаков. «Исключение исторического принципа их закрепления может привести к вытеснению местных

рыбозаготовительных организаций, а также к ущемлению интересов местного населения» – отмечают представители WWF [Об изменениях в Законе о рыболовстве, 2008]. Многие исследователи отмечали, что закон не направлен на создание равных условий для всех отечественных рыбохозяйственных предприятий и не способен обеспечить стабильную работу рыбохозяйственного комплекса.

Понимая несовершенство закона, исполнительные и законодательные органы государственной власти неоднократно инициировали в него изменения.

В поправках, внесенных Федеральным законом от 29.12.2006 № 260-ФЗ, уточнено понятие и статус рыбопромыслового участка, в частности, изъято положение о том, что в него включается прибрежная полоса суши.

Изменения, внесенные законом от 06.12.2007 № 333-ФЗ, были более обширны. Был уточнен ряд понятий законодательства, юридическая терминология закона, целый ряд статей (11–14, 17, 29, 32 и др.) получил новую редакцию, введены новые статьи (например, ст. 14¹ – Защита конкуренции в области рыболовства и сохранения водных биоресурсов) и даже новая Глава 3¹ «Решения органов государственной власти и договоры, на основании которых возникает право на добычу (вылов) водных биоресурсов, отнесенных к объектам рыболовства». В статье 17 установлены 8 рыбохозяйственных бассейнов. Введена норма: реализация водных биоресурсов и продуктов их переработки осуществляется на товарных биржах (часть 3 ст. 19). Уточнено положение ст. 24: «Граждане вправе осуществлять любительское и спортивное рыболовство на водных объектах общего пользования свободно и бесплатно, если иное не предусмотрено настоящим Федеральным законом». Установлено, что рыболовство в целях обеспечения традиционного образа жизни и осуществления традиционной хозяйственной деятельности коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока РФ может осуществляться без разрешения на добычу водных биоресурсов, за исключением добычи (вылова) редких и находящихся под угрозой исчезновения видов водных биоресурсов (часть вторая ст. 25). Изменен порядок перехода права на добычу от одного лица к другому (ст. 32).

Важным нововведением стало увеличение срока, на который предоставляются доли в квотах, до 10 лет (часть первая ст. 31). Это позволяет рыбакам делать долгосрочные вложения, например, строить новые суда, закупать оборудование для первичной переработки рыбы и др. Но в то же время из закона были убраны все по-

ложения, касающиеся контроля в области рыболовства и сохранения водных биоресурсов, исчезло понятие прибрежного рыболовства.

«Атака» на прибрежное рыболовство продолжилась и дальше, с введением в действие Федерального закона от 03.12.2008 № 250-ФЗ. Он вернул в ст. 1 понятие прибрежного рыболовства, однако изменил правовой статус данного института. «Прибрежное рыболовство, рыболовство во внутренних водных объектах, товарное рыбководство, искусственное воспроизводство лишились энергетики, данной им законом в 2004 году, и становятся немощными и несамостоятельными» [Быстров, 2010]. Разработав по поручению Президента РФ поправки по передаче полномочий субъектам федерации в части организации прибрежного рыболовства (ст. 20 закона о рыболовстве), Росрыболовство оставило субъектам РФ только теоретическую возможность организации рыбопромысловых участков для организации прибрежного рыболовства в территориальном море и внутренних морских водах.

Другие изменения в законе также носят неоднозначный характер, например, законодательное закрепление прилова (ст. 29² – Прилов водных биоресурсов). Опасения многих рыбаков вызывает положение о продаже всей рыбопродукции через биржи. Исключение условий надления прибрежными квотами только тех юридических и физических лиц, которые зарегистрированы в конкретном субъекте РФ, также не идет на пользу местным производителям. Вызывает критику введенная поправками 2007 и 2008 гг. процедура таможенного предъявления на территории Российской Федерации рыбы, пойманной в 200-мильной экономической зоне.

Сосредоточение функций по управлению и нормативно-правовому регулированию рыбной отрасли в одном органе (Федеральном агентстве по рыболовству), как ни странно, не привело к значительному повышению эффективности использования и охраны водных биоресурсов. Задачи, стоящие перед отраслью, рассматриваются в Росрыболовстве под своим углом, зачастую непонятным не только организованным рыбозаготовителям, но и высшим должностным лицам. В итоге годами назревавшие проблемы приходится решать Президенту РФ или премьер-министру во время поездок в проблемный регион. Однако и тогда поручения высших чиновников не исполняются либо исполняются настолько формально и таким образом, что извращается их первоначальный смысл.

Резко увеличилось число подзаконных актов, которые необходимо принять, чтобы закон заработал в полную силу. За 3 года их число пре-

высило 300, но, тем не менее, многие вопросы еще не урегулированы. Да и действующее нормативно-правовое обеспечение законодательства и основанная на нем организация ведения промысла также далеки от совершенства. Так, вызывают вопросы некоторые положения Правил рыболовства, в том числе в отношении параметров орудий лова и установленных промысловых размеров, допустимой величины прилова. Не всегда возможно оперативное регулирование ситуации на водоемах при помощи тех правовых инструментов, которые нам предлагает закон. Например, процедура принятия приказов о запрете вылова рыбы при превышении возможных или допустимых ее уловов на конкретный год затягивается на несколько месяцев, и зачастую приказ вступает в силу, утратив свое регулирующее значение.

Таким образом, существующее законодательство еще далеко от совершенства. Неурегулированность ряда отношений, отсутствие оперативных механизмов управления, спорный характер норм не способствуют сохранению и воспроизводству ВБР, тормозят развитие рыбной отрасли, заставляя рыбодобывающие организации нарушать закон, изначально призванный защищать интересы промысловиков и рыболовов-любителей.

Перспективы оптимизации законодательства о рыболовстве

30 марта 2009 г. Приказом Росрыболовства № 246 утверждена «Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года». Целью стратегии было объявлено формирование условий для устойчивого социально-экономического развития страны, достижения ею к 2020 г. лидирующих позиций среди мировых рыболовных держав путем перехода рыбохозяйственного комплекса от экспортно-сырьевого типа к инновационному типу развития на основе сохранения, воспроизводства, рационального использования ВБР и обеспечения глобальной конкурентоспособности рыбохозяйственного комплекса.

Однако достижение указанной цели связано с решением большого количества проблем, существующих в отрасли. Определенные надежды внушают поправки, внесенные в закон о рыболовстве в декабре 2010 г. Согласно им вводятся нормы прямого действия, отражающие специфику осуществления рыболовства в научно-исследовательских, контрольных, учебных и культурно-просветительских целях, в целях рыбководства, воспроизводства и акклиматизации

водных биоресурсов. Также уточняются нормы, касающиеся искусственного воспроизведения водных биоресурсов, особенностей осуществления любительского и спортивного рыболовства.

Но некоторые из этих нововведений вызывают обоснованные вопросы. Рыбаки опасаются, что они станут основой для передачи всех ВБР частным компаниям, в том числе и при организации любительского и спортивного рыболовства, что сделает всю рыбалку платной. Из статьи 25 закона убрали п. 4, в котором говорится, что любительская и спортивная рыбалка на рыбопромысловых участках могла осуществляться только с согласия пользователя. На практике было совершенно непонятно, что означает это самое «разрешение пользователя», как оно должно выглядеть. Но эта норма, по сути, продолжает действовать, будучи закреплена в правилах рыболовства для каждого рыбохозяйственного бассейна. Остается надеяться, что в скором времени нормы, связанные с организацией любительского и спортивного рыболовства, примут новую, адекватную редакцию.

Положительным моментом можно считать принятое Правительством РФ Распоряжение от 21.01.2011 об отмене ветеринарно-сопроводительных документов на улов рыбы. Еще 22 июля 2010 г. Федеральная антимонопольная служба признала эту норму нарушающей антимонопольное законодательство и приводящей к установлению дополнительных административных барьеров на этом рынке. Теперь при транспортировке рыбной продукции достаточно наличия копии разрешения на добычу (вылов) ВБР.

Важным шагом видится принятие в ближайшем времени закона об аквакультуре, в котором будут четко отражены вопросы собственности на объекты рыбоводства и особенности правового регулирования данного вида деятельности.

Главной целью политики в области рыболовства является обеспечение устойчивого управления ВБР и эффективной работы природоохранного законодательства. Концепция устойчивого управления базируется на экосистемном подходе и принципах непрерывности и неистощимости многоцелевого пользования водными объектами и их ресурсами. Она подразумевает управление водными объектами, использование их, а также водосборного бассейна этих объектов таким образом, чтобы обеспечить сохранение их разнообразия, продуктивности, воспроизводственной способности, жизнеспособности и потенциала выполнения ими – в настоящем и в будущем – соот-

ветствующих экологических, экономических и социальных функций на местном, социальном и глобальном уровнях.

Базовые критерии устойчивого управления водными объектами и их ресурсами включают: а) сохранение качества вод; б) поддержание продукционной способности водных экосистем; в) поддержание жизнеспособности водных экосистем в условиях негативных антропогенных и природных воздействий; г) сохранение биологического разнообразия; д) поддержание и расширение множественных социально-экономических выгод для удовлетворения общественных нужд; е) юридические, организационные и экономические рамки для сохранения и устойчивого управления водными объектами. На основании этих критериев нами разрабатываются схемы рационального развития рыбного хозяйства на внутренних водоемах [Лукин, Глибко, 2009].

Заключение

Основа современного нормативного правового регулирования рыболовства и охраны водных биоресурсов была заложена в середине прошлого века. Однако в новейшей истории России рыболовство долгое время оставалось (и остается сейчас) проблемной отраслью, а законодательство в этой сфере формируется медленно и с большим трудом. Этот фактор в совокупности с несовершенством принимаемых нормативных актов, неэффективностью системы контроля за пользователями рыбными ресурсами стали причинами кризисных явлений в рыбной отрасли и негативных тенденций, таких как браконьерство, нерациональный характер лова, недостоверность учета добытой рыбы, сокрытие уловов, направленный характер промысла на вылов ценных видов рыб.

Специальный закон «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» был принят только в декабре 2004 г. Он в значительной мере изменил систему организации и управления рыбным хозяйством: были закреплены основные понятия рыбного хозяйства, упорядочена система предоставления в пользование водных биоресурсов, закрепления долей в квотах добычи для организованных пользователей на 10-летний период. В соответствии с законом для всех рыбохозяйственных бассейнов утверждены правила рыболовства.

Однако малое количество норм прямого действия, «громоздкость», негибкость, противоречия и дискуссионный характер многих положений, неурегулирование или неудачное урегулирование ряда вопросов (прибрежное,

спортивное и любительское рыболовство) не позволяют закону о рыболовстве работать в полную силу.

Подход к обоснованию системы рыбного хозяйства с учетом социально-экономических факторов, исторического опыта показывает, что устойчивое пользование ВБР возможно при соблюдении принципов многоцелевого использования, непрерывности и неистощимости. При этом регулирование общественно-экономических процессов в отрасли должно происходить на основе четкой, понятной, адекватной потребностям общества и экономических субъектов нормативной правовой базы, в которой большое количество норм являются нормами прямого действия, исключая произвольную трактовку и возможности для коррупции и произвола со стороны органов власти.

Литература

Арсюхин Е. Рыбаки и море // Российская газета. Федеральный выпуск № 3661 от 23.12.2004.

Быстров И. Пять лет в законе // Рыбак Сахалина, 17.06.2010. URL: <http://www.fishnews.ru/rubric/smi-orybolovstve/2545> (дата обращения: 20.01.2011).

Конституция Российской Федерации от 12 декабря 1993 года (с изм. от 30.12.2008 № 6-ФКЗ и от 30.12.2008 № 7-ФКЗ) // Российская газета. 2009. 21 янв. (№ 7).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Глибко Оксана Ярославовна

старший научный сотрудник
Карельское отделение ФГНУ Озерного и речного рыбного хозяйства
Пряжинское шоссе, 10, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185000
эл. почта: ojagli@mail.ru
тел.: 89212243409

Лукин Анатолий Александрович

главный научный сотрудник, д. б. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: alukin@inbox.ru
тел.: (8142) 576381

Прищепа Борис Федорович

директор ФГУП ПИНРО
ул. Книповича, 6, Мурманск, Россия
эл. почта: pboris@pinro.ru
тел.: (8142) 576541

Лукин А. А., Глибко О. Я. Оптимизация системы управления рыбным хозяйством на внутренних водоемах как способ сохранения водных биоресурсов // Рыбное хозяйство. 2009. № 4. С. 96–99.

Национальная стратегия сохранения биоразнообразия. М.: Российская Академия Наук, Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2001. 76 с.

Об изменениях в Законе о рыболовстве // Всемирный фонд дикой природы (WWF): позиции по вопросам, 2008. URL: <http://www.wwf.ru/about/positions/fisherylaw/> (дата обращения: 25.01.2011).

Об охране окружающей среды. Сб. документов партии и правительства, 1917–1981 гг. М.: Политиздат, 1981. 384 с.

Постановление Государственной Думы ФС РФ от 24.10.1996 № 734-II ГД «О проекте Федерального закона „О рыболовстве и об охране водных биоресурсов“» // Собрание законодательства РФ, 11.11.1996, № 46, ст. 5211.

Постановление Совета Министров СССР от 15.09.1958 № 1045 «О воспроизводстве и охране рыбных запасов во внутренних водоемах СССР» // СП СССР, 1958, № 16, ст. 127.

Федеральный закон «О животном мире» от 24.04.1995 № 52-ФЗ (ред. от 20.04.2007 № 57-ФЗ) // СЗ РФ, 24.04.1995, № 17, ст. 1462; 23.04.2007, № 17, ст. 1933.

Федеральный закон «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» от 20.12.2004 № 166-ФЗ // СЗ РФ, 27.12.2004, № 52 (ч. 1), ст. 5270.

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 года №7-ФЗ // СЗ РФ, 14.01.2002, № 2, ст. 133.

Glibko, Oksana

Inland Fish Economy Research Institute, Karelian Division
10 Pryazhinskoye Sh., 185000 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ojagli@mail.ru
tel.: 89212243409

Lukin, Anatoly

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alukin@inbox.ru
tel.: (8142) 576381

Prishchepa, Boris

Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO)
6 Knipovich St., Murmansk, Russia
e-mail: pboris@pinro.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 628.1/3: 004.9

РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ»

А. В. Литвиненко, М. С. Богданова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

В настоящее время накоплены большие объемы информации по водным ресурсам Республики Карелия и их использованию. Обработка и анализ этих данных в ручном режиме требует огромных затрат времени и сил, при этом возможны субъективные ошибки. Наиболее перспективным в водохозяйственных исследованиях является применение ГИС-технологий. Сотрудниками Института водных проблем Севера была выполнена работа по созданию ГИС «Водопотребители Республики Карелия». Основной целью работы было создание специализированной геоинформационной системы, обеспечивающей процессы формирования, ведения и представления данных по использованию водных ресурсов Республики Карелия для хозяйственных нужд.

ГИС создана в формате MapInfo 9.5. В ней сформированы тематические картографические слои: «Водосборные бассейны», «Водоемы», «Водотоки», «Водопотребители», «Забор воды», «Сброс сточных вод», «Химические показатели сточных вод». Для удобной работы с ГИС разработана система запросов, позволяющая оперативно получать необходимую информацию, находить нужные выборки данных за отдельный год или в динамике, создавать отчеты и тематические карты.

Ключевые слова: хозяйственное использование, водопотребление, водоотведение, ГИС-технологии.

A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova. GUIDELINES ON THE USE OF GIS-TECHNOLOGY IN THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCE USE

Extensive information on water resources of Karelia and their utilization has been amassed. Manual processing and analysis of these data is very time- and labour-intensive, and subjective errors are likely to occur. Application of GIS technologies in water economy studies is most promising. Northern Water Problems Institute has performed work to create the GIS «Water Consumers of Republic of Karelia». The principal objective was to generate a specialized GIS to support the processes of gathering, maintaining and providing data on the utilization of water resources in Republic of Karelia for economic purposes.

The GIS was created in the MapInfo 9.5 format. It comprises thematic map layers «Drainage basins», «Waterbodies», «Watercourses», «Water consumers», «Water withdrawal», «Wastewater discharges», «Wastewater chemical indices». To make the GIS more convenient to work with, the query system was developed, which enables express retrieval of the necessary information, isolation of certain datasets for a specified year or in dynamics, generation of reports and thematic maps.

Key words: uses, water consumption, water discharges, GIS technologies.

Введение

Использование географических информационных технологий (ГИС) в разных сферах знаний, в том числе и при выполнении географических исследований, свидетельствует о возможности решения большого спектра научных и практических вопросов средствами ГИС. ГИС-технологии позволяют автоматически выполнять пространственные операции с объектами на карте, анализировать имеющуюся атрибутивную информацию и оперативно получать результаты для оценки.

В настоящее время накоплены большие объемы информации по водным ресурсам и их использованию. Обработка и анализ этих данных в ручном режиме требует огромных затрат времени и сил, при этом возможны субъективные ошибки. Применение ГИС-технологий при водохозяйственных исследованиях наиболее перспективно. Сотрудниками лаборатории географии и гидрологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН была выполнена работа по созданию ГИС «Водопотребители Республики Карелия» [Богданова и др., 2009, 2010].

Материалы и методы

Основной целью работы было создание специализированной геоинформационной системы, обеспечивающей процессы формирования, ведения и представления данных по использованию водных ресурсов Республики Карелия (РК) для хозяйственных нужд, включающей:

- систематизацию существующей информации о водных ресурсах и водных объектах;
- обеспечение официальной информацией о водных объектах всех субъектов водных отношений;
- объективную оценку состояния водных объектов по качественным и количественным показателям;
- анализ водопотребления и водоотведения и т. д.

Работа выполнена по современным цифровым картам масштабов 1 : 1 000 000, подготовленным ГП Аэрогеодезия, и имеющимся в ИВПС базах данных по водным объектам и водопользователям. Также были использованы данные реестра водных объектов РК, созданного в ИВПС, и соответствующей ГИС на основе электронной картографической основы масштаба 1 : 1 000 000. Эти результаты представлены как в электронном виде, так и опубликованы в форме «Каталога озер и рек Карелии» [2001]. Кроме «Каталога...» для характеристики водных объектов использовались материалы «Ресур-

сов поверхностных вод...» [1965], а также базы данных по «Водопользователям РК» и «Гидротехническим сооружениям» ИВПС. В качестве программных средств ГИС использовалось MapInfo 9.5.

Результаты и обсуждение

Применение геоинформационных технологий в управлении использованием водных ресурсов основано на создании геоинформационной системы, осуществляющей сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственно-координированных данных по водным объектам. Работа по созданию ГИС «Водопотребители Республики Карелия» включала несколько этапов:

1. Разработка и создание баз данных по водным ресурсам и их использованию.
2. Разработка системы кодификаторов и справочников для упрощения работы пользователей по вводу информации в систему, уменьшения количества ошибок при вводе информации, увеличения поисковых возможностей системы и унификации порядка работы с атрибутивными данными.
3. Привязка баз данных к пространственной информации и создание тематических картографических слоев.
4. Разработка системы запросов к таблицам с атрибутивной информацией.
5. Создание форм представления отчетной информации об объектах: тематических карт, таблиц, диаграмм и графиков.

В ходе проделанной работы были сформированы цифровые картографические базы данных: «Водосборные бассейны», «Водоемы», «Водотоки», «Водопотребители», «Химические показатели сточных вод», содержащие картографическую и атрибутивную информацию (рис. 1).

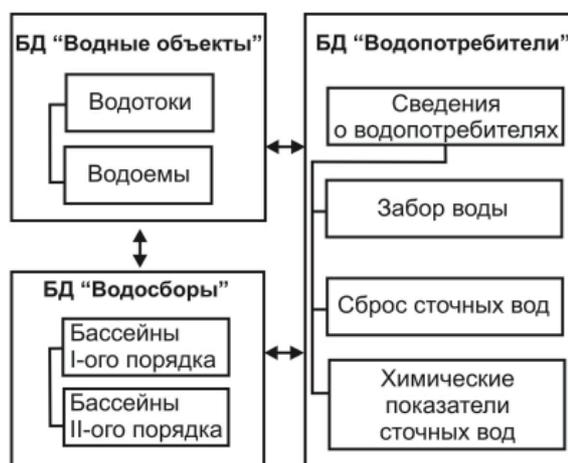


Рис. 1. Структура базы данных «Водные ресурсы Республики Карелия и их использование»

База «Водосборные бассейны» содержит информацию по 5 водосборным бассейнам 1-го порядка: Белое море, Каспийское море, Ботнический залив, Онежской озеро, Ладожское озеро, а также по 19 водосборным бассейнам 2-го порядка (например, р. Шуя, р. Водла и др.).

Для водных объектов слоев «Водоёмы» и «Водотоки» была разработаны система уникальных кодов, которая позволила идентифицировать 3524 озера и 2069 рек на карте масштаба 1 : 1 000 000.

Код озера составляется из: двух заглавных букв «ОЗ» (озеро) + двух заглавных букв названия водосборного бассейна 1-го порядка (Белое море – «БМ», Каспийское море – «КМ», Ботнический залив – «БЗ», Онежской озеро – «ОН»,

Ладожское озеро – «ЛА») + код водосборного бассейна 2-го порядка (от 01 до 19) + трехзначное число (от 001 до n), обозначающее номер конкретного водного объекта (рис. 2).

Код реки составляется из: одной заглавной буквы «Р» (река) + двух заглавных букв названия водосборного бассейна 1-го порядка (аналогично озерам) + код водосборного бассейна 2-го порядка (от 01 до 19) + две цифры (от 01 до n) главной реки + две цифры (от 01 до n) приток 1-го порядка + и т. д. (если есть еще притоки). Нумерация рек внутри водосбора производилась с севера на юг и с запада на восток. Нумерация притоков – от истока к устью и вокруг озера по часовой стрелке от главной реки (см. рис. 2).

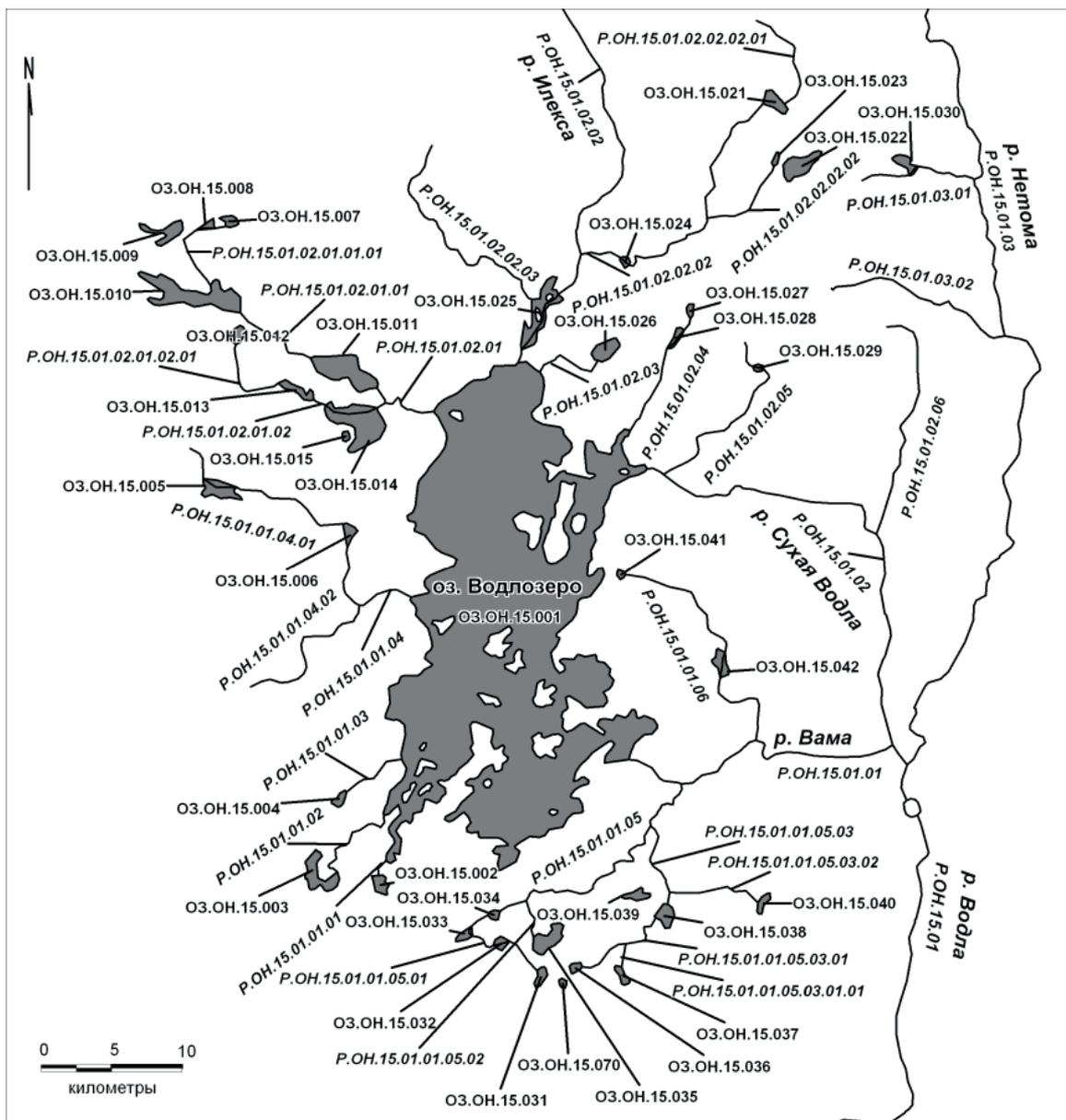


Рис. 2. Индексация водных объектов среднего участка озерно-речной системы р. Водлы (ОЗ.ОН.15.001 – код озера; Р.ОН.15.01 – код реки)

Структура таблиц по водным объектам включает информацию о кадастровом номере, морфометрии (площади озера, длине береговой линии, глубине, длине реки и т. п.), водоохраных зонах, прибрежных защитных полосах и категориях рыбохозяйственной значимости.

База данных «Водопотребители» состоит из четырех таблиц: «Сведения о водопотребителях», «Забор воды», «Сброс сточных вод», «Химические показатели сточных вод». Для осуществления связи между таблицами была разработана система индексных полей – код района, код населенного пункта, код водного объекта. Каждому водопотребителю для идентификации был присвоен уникальный семизначный код, который складывается из кода района, кода населенного пункта и номера водопотребителя.

Основная таблица этой базы данных «Сведения о водопотребителях» содержит информацию о водопотребителе: название, размещении (район, населенный пункт), специализацию (отрасль и суботрасль экономики), источнике водоснабжения, водоподающих сетях, а также о бассейне (первого и второго порядка), к которому относится источник водоснабжения.

Таблица «Забор воды» включает в себя тематические данные по забору воды из природных источников и других водоподающих сетей, цели использования воды (хозяйственно-питьевые, промышленные, рыбохозяйственные, сельскохозяйственные и прочие нужды), информацию

о передаче воды (чистой и после использования), а также ее потерях.

Таблица «Сброс сточных вод» содержит данные о: приемнике сточных вод (водный объект, выгреб, рельеф), водном бассейне приемника (первого и второго порядка), количестве сброшенной воды, качестве очистки, количестве переданной воды (чужих стоков по сети, дренажных вод), мощности очистных сооружений, оборотном и повторном водопотреблении.

Таблица «Химические показатели сточных вод» содержит информацию о наличии и количестве в воде взвешенных частиц, нефтепродуктов, БПК и других химических компонентов.

База данных «Водопотребители» формируется для отдельного года. В настоящее время созданы базы по 2002, 2003, 2005, 2007, 2008 и 2009 гг., что дает возможность анализировать динамику водопотребления, делать прогнозы развития водного хозяйства и т. д.

Для удобной работы с ГИС разработана система запросов (рис. 3), которая позволяет оперативно получать необходимую информацию, находить нужные выборки данных за отдельный год или в динамике по годам, создавать отчеты и тематические карты (рис. 4).

ГИС «Водопотребители Республики Карелия» предназначена для решения научных и прикладных задач инвентаризации, анализа, оценки, прогноза и управления использованием водных ресурсов. ГИС также может быть

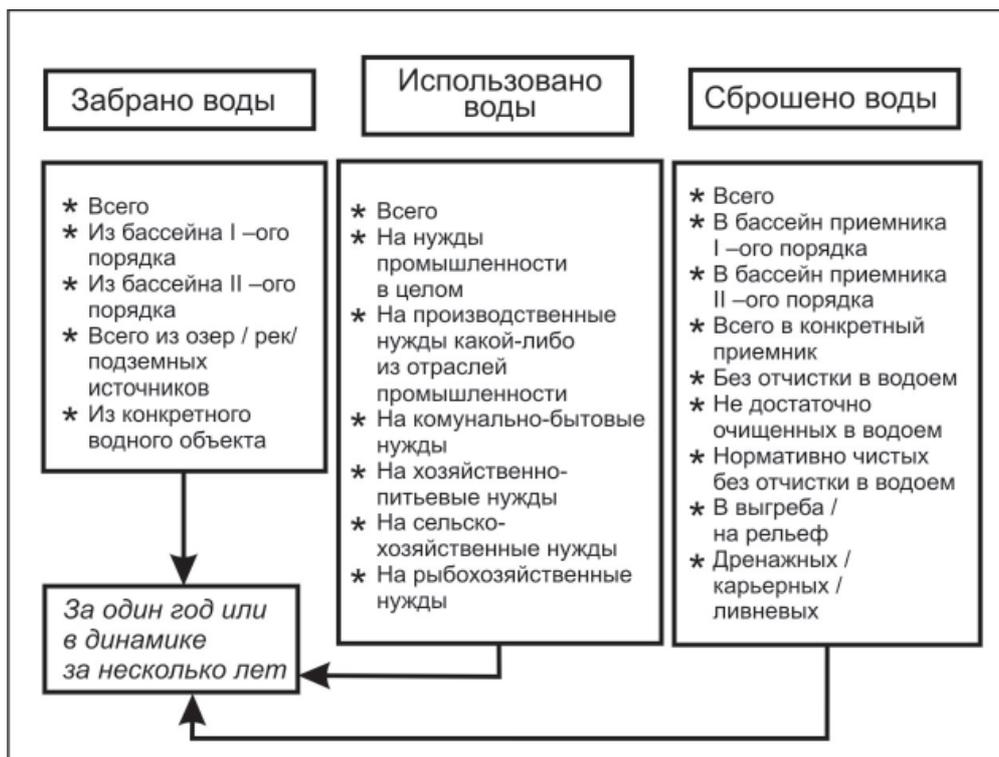


Рис. 3. Система запросов

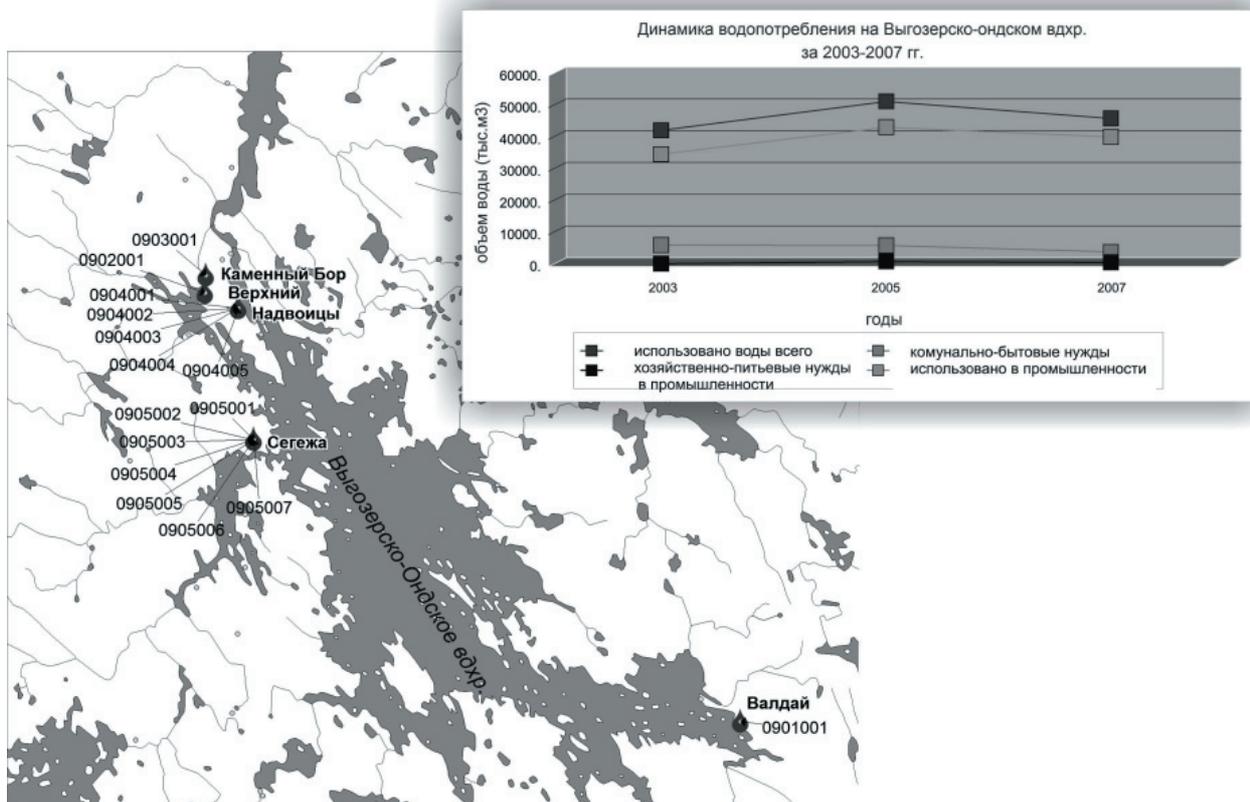


Рис. 4. Отчет по запросу «Водопотребление из Выгозерско-Ондского водохранилища» (0903001 – код водопотребителя)

использована в работе министерств, ведомств и других организаций, связанных с вопросами учета, рационального использования и охраны водных ресурсов.

Литература

Атлас «Карелия. Южная часть». Масштаб 1 : 100 000. 2004.

Атлас «Карелия. Центральная часть». Масштаб 1 : 100 000. 2005.

Атлас «Карелия. Северная часть». Масштаб 1 : 100 000. 2005.

Богданова М. С., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Применение геоинформационных технологий в

водохозяйственных исследованиях // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона». В. Новгород, 2009. С. 25–31.

Богданова М. С., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Применение ГИС-технологий в исследованиях водохозяйственных комплексов // Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 16. М., 2010. С. 47–52.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2001. 290 с.

Общегеографический региональный атлас «Республика Карелия». Масштаб 1 : 200 000. 2002.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л., 1965. 700 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: aleks-litvinenko@mail.ru
тел.: +79212239383

Litvinenko, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: aleks-litvinenko@mail.ru
tel.: +79212239383

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: mari-mb@mail.ru
тел.: +79214630148

Bogdanova, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mari-mb@mail.ru
tel.: +79214630148

УДК 551.582.(470.22)

ОБ ОЦЕНКЕ КОМФОРТНОСТИ КЛИМАТА КАРЕЛИИ

Л. Е. Назарова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

В представленной работе рассматриваются вопросы экологической оценки климата Карелии с учетом современных данных наблюдений. В зависимости от сочетания величин метеорологических параметров в сроки наблюдений выделяются пять типов погоды, характеризующие комфортность климата, оценивается их повторяемость.

Ключевые слова: типы погоды, комфортность климата.

L. E. Nazarova. ABOUT ASSESSMENT OF COMFORTABLE CLIMATE OF KARELIA

Ecological evaluation of the climate of Republic of Karelia is considered with due regard to the modern observational data. Depending on combination of values of standard meteorological parameters, five types of local weather are distinguished, which characterize the climate comfort. Their frequency is evaluated.

Key words: weather types, comfortable climate.

Введение

Карелия расположена в северо-западной части умеренного климатического пояса. Климатический режим республики можно охарактеризовать как переходный от морского к континентальному; по классификации Б. П. Алисова, в основу которой положена зависимость возникновения различных типов климата от условий общей циркуляции атмосферы, климат Карелии относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Это означает, что в течение года для Карелии характерно преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения. В среднем за год на территории Карелии, относящейся к зоне избыточного увлажнения, выпадает 550–750 мм осадков. Преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений. Средняя годовая температура воздуха изменяется от 0 °С на севере до 3 °С на юге. Самый холодный месяц – январь (–12 ... –13 °С в северной части, –9 ... –10 °С – в южной). Самый теплый месяц

года – июль (14–15 °С на севере и 16–17 °С на всей остальной территории республики).

Одной из первых работ, наиболее полно обобщающих сведения о климате Карелии, была монография А. А. Романова [1961]. Климатические условия отдельных районов Карелии подробно рассмотрены в книгах «Климат Петрозаводска» [1982] и «Климат Сортавалы» [1988]. Карты, характеризующие климат Карелии, приведены в «Атласе Карельской АССР» [1989]. «Научно-прикладной справочник по климату СССР» [1988] содержит данные по 9 метеорологическим станциям (МС) Карелии из 32 существовавших на тот момент станций (данные до 1980 г.). В работе Н. Н. Филатова [1997] рассмотрены условия формирования и основные характеристики климата в районе Ладожского и Онежского озер. Ко времени написания данной статьи в базе данных ИВПС КарНЦ РАН содержались сведения об основных климатических параметрах по 1990 г.

В представленной работе особое внимание уделено оценке климата Карелии как среды

обитания с учетом современных данных наблюдений. Оценка климата как жизнеобеспечивающего фактора требует учета множества параметров, сочетание которых обуславливает интегральный эффект его воздействия на человека. Для оценки влияния климата на человека предложены многочисленные биоклиматические коэффициенты, которые должны отражать совместное действие различных гидрометеорологических факторов. При этом климат, эффективность его влияния на здоровье человека зависят от сочетания с другими компонентами ландшафта – водоемами, растительным покровом, рельефом, почвой [Исаченко, 2003]. Но именно климат играет роль прямого экологического, лимитирующего фактора, непосредственно обуславливающего степень комфортности среды обитания.

Оценки влияния среды обитания, в том числе и климата, на условия проживания населения были выполнены в СССР, в результате Республика Карелия была отнесена к северным территориям, на которые распространяются определенные социально-экономические льготы в связи со специфическими природными условиями. Первые исследования особенностей влияния среды обитания на здоровье населения Карелии (Олонецкой губернии) можно отнести к XVIII в. – времени создания первого в России курорта «Марциальные воды». Ряд работ свидетельствует о том, что в Олонецкой губернии XIX в. эпидемическая ситуация была крайне неблагоприятной [Потахин, 1999], в том числе из-за природных особенностей. В XX в. в СССР были выполнены исследования природных и социально-экономических особенностей, а также состояния здоровья населения КАССР, направленные на выявление региональных медико-географических закономерностей. В результате обобщения, выполненного коллективом авторов, был выпущен «Медико-географический справочник Карельской АССР» [1990].

Материалы и методы

Для составления характеристики климатических условий Карелии в работе использованы данные многолетних наблюдений на станциях и постах Северо-Западного территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных на территории Карелии, за период от начала наблюдений на станциях до 2008 г.

Для оценки типов погоды с точки зрения комфортности применялась методика Н. А. Даниловой, которая, используя в качестве ос-

новы физиолого-климатическую типизацию И. С. Кандрора, разработала оценочную шкалу для определения типа и благоприятности рекреационной погоды для летнего отдыха. В зависимости от сочетания величин метеорологических параметров (температура воздуха, облачность в баллах, скорость ветра, а также количество и интенсивность выпадения атмосферных осадков, туманы) выделяются пять типов погоды: холодная дискомфортная, прохладная субкомфортная, комфортная, жаркая субкомфортная и жаркая дискомфортная. Подробнее методика оценки типов погоды изложена в работе Н. А. Даниловой [1980].

Результаты и обсуждение

Одним из определяющих климатообразующих факторов для Карелии является недостаточное количество поступающей солнечной радиации. В зимние месяцы максимальная высота солнца над горизонтом в районах Карелии не превышает 5°, в то время как ультрафиолетовые лучи с длиной волны короче 302–305 нм, благотворно влияющие на организм человека, достигают поверхности Земли только при высоте солнца над горизонтом не менее 25–30°. Повторяемость пасмурного состояния неба (8–10 баллов общей облачности) в осенне-зимний период составляет 83–88 %, что приводит к уменьшению продолжительности солнечного сияния (ПСС) в Карелии до 34–37 % от возможного. Теоретически возможная ПСС в Карелии составляет 4530 ч в год. Однако действительное ее значение из-за пасмурной погоды уменьшается до 37 % от возможного и равно в среднем 1674 ч/год. В Петрозаводске за год наблюдается в среднем 119 дней без солнца. Самым «пасмурным» за период наблюдений за ПСС (1951–1990) был 1952 г., когда солнце не наблюдалось 151 день. Наибольшее число дней без солнца на юге Карелии отмечается в декабре (в среднем – 26 дней, в отдельные годы (1984) – 30 дней).

Количество поступающей солнечной радиации определяет продолжительность холодного периода (со средними суточными температурами ниже 150–170 °С), который в Карелии повсеместно превышает 150–170 сут. Продолжительность отопительного периода в среднем 250–270 дней. Лето (устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 10 °С) наступает в конце мая на юге и в середине июня – на севере республики. Устойчивый же период времени с температурами воздуха выше 15 °С по северу Карелии бывает только в теплые годы (обеспеченность менее 50 %).

В любые сезоны года для климатических условий Карелии характерна частая смена воздушных масс. В целом для территории республики наблюдается 215 дней с циклонами в течение года (для сравнения – в районе Москвы циклоны наблюдаются в течение 150–160 дней за год). Интенсивная циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов обуславливают значительную изменчивость, порой даже в течение суток, значений метеорологических элементов и параметров. Так, именно прохождение глубокого ныряющего циклона вызвало повышение температуры воздуха в Петрозаводске с 7 ч 31 января до 7 ч 1 февраля 1956 г. на 28,2 °С [Климат Петрозаводска, 1982]. Прохождением циклона было обусловлено и падение атмосферного давления 8 января 1973 г. на 38,3 гПа за сутки. Приведенные примеры, конечно, являются экстремальными, однако и средняя межсуточная изменчивость метеозлементов в Карелии довольно значительна. Для Петрозаводска средние значения колебаний температуры воздуха от суток к суткам составляют 2–3 °С с мая по октябрь и 3–4 °С – с ноября по апрель. Для атмосферного давления межсуточная изменчивость наибольшая в зимние месяцы (в среднем 6,6–7,2 гПа), в летние – наименьшая (3,6–4,3 гПа).

Для решения многочисленных практических задач, в частности связанных с оценкой комфортности климатических условий территории для отдыха и туризма, необходимы комплексные климатические характеристики. Когда мы говорим о климате, то имеем в виду многолетний режим погоды в данной местности, т. е. средние значения за период времени не менее 30 лет и экстремальные значения метеорологических характеристик и параметров за многолетний период. На организм человека воздействуют не метеовеличины сами по себе, а их сочетание и значительные колебания в данный момент времени. Поэтому прежде чем говорить о комфортности климата, нужно оценивать комфортность погодных условий. Простое суммирование отдельно действующих на человека температуры воздуха, давления, влажности и т. д. не идентично действию на него всего погодного комплекса. Согласно определению, приведенному в «Экологической климатологии» [Исаев, 2003], комфортной можно считать погоду, когда сочетание метеорологических величин таково, что здоровый человек не испытывает ни жары, ни холода, ни духоты, т. е. чувствует себя наилучшим образом. Специалисты выделяют несколько типов погоды, взяв за основу различные сочетания температуры воздуха, скорости ветра и количества облачности.

В данном исследовании, как было указано ранее, использована методика Н. А. Даниловой. Далее, оценив погодные условия для каждого конкретного дня в каждом пункте наблюдений за продолжительный период времени, можно говорить о комфортности или дискомфортности климатических условий территории.

Для определения типов погоды в районе Онежского озера были использованы данные наблюдений на метеорологических станциях (МС) Петрозаводск – Сулажгора и Пудож за 1999–2008 гг. Исследование современных данных позволит оценить климатические условия района именно за тот период времени, когда во всем мире фиксируются наиболее значимые изменения в климатических системах различного масштаба. Изучалось сочетание указанных выше величин метеорологических параметров для каждого из восьми сроков наблюдения в сутки в течение рассматриваемого периода.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

Устойчивого периода комфортных климатических условий в районе Онежского озера, так же как и на всей территории Карелии, нет. В среднем за год наблюдается 10–12 дней, когда в течение целых суток погода остается комфортной. За 10 лет наблюдений в мае такой случай был отмечен только 1 раз в районе Петрозаводска и ни разу по данным наблюдений МС Пудож. Дискомфортность климата определяется в основном низкими температурами в сочетании со значительным количеством облачности и высокой влажностью воздуха. Наибольшее количество дней с комфортным типом погоды в течение суток возможно в июле и составляет в среднем 6,5–6,9 дня (рис. 1). Вследствие преобладания переноса воздушных масс, сформировавшихся над Атлантикой, над районом исследований наблюдается значительная облачность. В теплое полугодие, когда циклоническая деятельность менее активна, количество общей облачности составляет в среднем до 6,5–7,5 балла за месяц по десятибалльной шкале. Преобладающим во все сезоны года является пасмурное состояние неба (облачность более 7 баллов). В среднем для Карелии число дней с относительной влажностью воздуха более 80 % в течение суток составляет за год 150–170 дней, а с влажностью менее 30 % – всего 3–9 дней. Район исследований, так же как и вся территория Карелии, относится к зоне избыточного увлажнения. В среднем за год выпадает 600–650 мм осадков. Внутригодовое распределение осадков не является равномерным. В течение теплого периода (с мая по октябрь) выпадает до 400 мм осадков, наибольшие суммы

осадков за месяц (по климатическим нормам) характерны для августа и сентября – 78 и 71 мм соответственно.

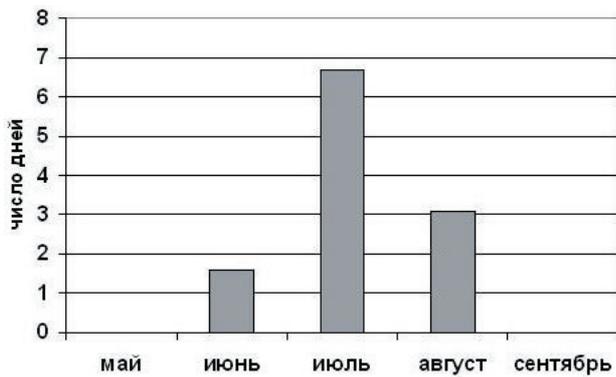


Рис. 1. Среднее число дней с комфортным типом погоды в течение суток в районе г. Пудож за 1999–2008 гг.

Далее, как рекомендовано в методике [Данилова, 1980] и принято в биоклиматических исследованиях, определение рекреационного типа погоды (т. е. погодных условий, комфортных для различных видов отдыха) производилось по ежедневным данным за 12-часовой срок наблюдений.

Установлено, что дни с комфортным типом погоды в дневные часы могут отмечаться в исследуемом районе в период с мая по сентябрь, достигая максимума в июле – августе (до 27 дней). Однако следует заметить, что комфортные условия в 12 ч дня не означают, что такая же погода будет наблюдаться в вечерние и особенно в ночные часы. Абсолютный минимум температуры воздуха в июле по данным МС Пудож $-0,1^{\circ}\text{C}$ (1986 г.), августа – $-2,9^{\circ}\text{C}$ (1983 г.). С октября по апрель погода холодная дискомфортная даже в дневные часы (рис. 2). В июне – августе в течение 1999–2008 гг. было отмечено в среднем 2–7 дней (максимальное количество 16 дней в

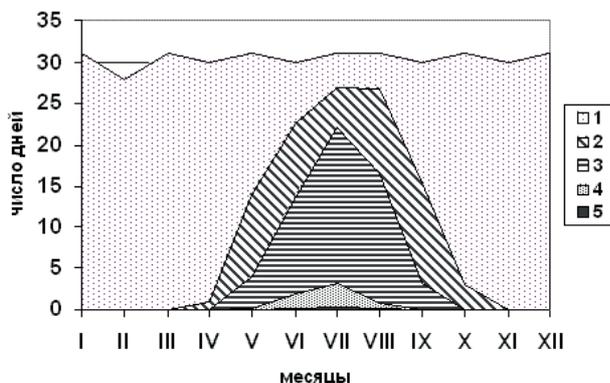


Рис. 2. Распределение типов погоды по месяцам в районе г. Петрозаводска в 12 ч (1999–2008 гг.):

1 – холодная дискомфортная, 2 – прохладная субкомфортная, 3 – комфортная, 4 – жаркая субкомфортная, 5 – жаркая дискомфортная

июле 2003 г. в Пудоже), когда в полдень наблюдалась жаркая субкомфортная погода (температура воздуха выше $24,0^{\circ}\text{C}$) и в среднем 1 день с жаркой дискомфортной погодой (температура воздуха выше 30°C). В отдельные годы температурный режим территории может значительно отличаться от многолетних значений. Так, например, летом 2010 г. по данным наблюдений на МС Пудож в течение июля – августа в этом районе было отмечено 17 дней, когда температура воздуха в дневные часы превышала $+30,0^{\circ}\text{C}$, а 29 и 30 июля достигала значений $+35,5$ и $+35,6^{\circ}\text{C}$ соответственно.

В начале XXI в. предпринимались попытки новых классификаций территорий России по уровню комфортности проживания населения по природно-климатическим факторам, дискомфорта жизнедеятельности населения с выделением новой географической границы Севера [Критерии и методические подходы..., 2003]. В этом документе сделана попытка использования интегрального принципа оценки зон комфортности и/или дискомфорта территории для проживания населения и районирования территории РФ. Авторы методики предложили, что «этап получения интегральной оценки состоит в вычислении в каждой точке градусной сетки среднего балла показателей зональных факторов и суммы баллов показателей азональных факторов и их суммировании». При таком подходе к классификации территории России отсутствие таких неблагоприятных, опасных явлений, как тайфуны, цунами, штормовые нагоны, оползни и т. д., типичных для одних регионов и несвойственных другим, например Карелии, может иметь большой «вес» в интегральной характеристике. В результате вычисления интегральных показателей было выполнено районирование территории России, согласно которому Карелия попадает в одну зону комфортности с Москвой, Московской, Калининградской областями, частью Краснодарского края. Очевидно, такое сравнение ошибочно.

Выводы

Климатические условия территории Карелии складываются под влиянием воздушных масс, формирующихся над Атлантикой и Арктикой. Особенности циркуляционного режима, а также количество солнечной радиации, поступающее соответственно географической широте территории, близость Балтийского, Белого и Баренцева морей, интенсивная циклоническая деятельность во все времена года, комплекс местных, крайне разнообразных природных условий (рельеф, обилие озер и болот и т. п.)

определяют продолжительную, но не суровую зиму; позднюю весну с частыми возвратами холодов; прохладное, короткое лето; высокую относительную влажность воздуха; значительное количество осадков и неустойчивые погодные условия в течение всех сезонов. Характерной чертой климата республики является резкая изменчивость метеорологических показателей за короткие отрезки времени, вызванная частой сменой воздушных масс при интенсивной циклонической деятельности. В представленной работе особое внимание уделено оценке комфортности и/или дискомфорта территории для проживания населения. Установлено, что устойчивого периода комфортных климатических условий на территории Карелии нет. В среднем за год наблюдается 10–12 дней, когда в течение целых суток погода остается комфортной.

Вопрос влияния климатических факторов на особенности условий проживания населения региона требует дальнейшей проработки климатологами, медиками, биологами и другими специалистами.

Литература

Атлас Карельской АССР. М.: ГУГК СССР, 1989. С. 14–15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Назарова Лариса Евгеньевна

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

Данилова Н. А. Климат и отдых в нашей стране. М.: Мысль, 1980. 155 с.

Исаев А. А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2003. 472 с.

Исаченко А. Г. Введение в экологическую географию. СПб.: СПбГУ, 2003. 191 с.

Климат Петрозаводска / Ред. Ц. А. Швер. Л., 1982. 212 с.

Климат Сортавалы / Ред. Ц. А. Швер и Л. С. Раковой. Л., 1988. 117 с.

Критерии и методические подходы для районирования территории РФ по природным условиям жизнедеятельности населения. М.: Минэкономразвития, 2003.

Медико-географический справочник Карельской АССР / Под ред. А. А. Келлера. Петрозаводск: Карельский НЦ АН СССР, 1990. 195 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6, вып. 3. Карельская АССР, Ленинградская, Новгородская, Псковская и Смоленская области. Л., 1988. 692 с.

Потахин С. Б. Свод опасных и неблагоприятных природных процессов и явлений на территории Олонецкой губернии XIX века. Петрозаводск: КГПУ, 1999. 148 с.

Романов А. А. О климате Карелии. Петрозаводск, 1961. 139 с.

Филатов Н. Н. Изменения климата Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1997. 147 с.

Nazarova, Larisa

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.12:556.531.4(470.22)

РОЛЬ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КАРЕЛИИ

И. Ю. Потапова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Рассмотрена роль атмосферных осадков в формировании химического состава поверхностных вод Карелии с использованием двух методических подходов. Оценка вклада атмосферной составляющей выполнена по многолетним данным химического состава осадков с учетом состава поверхностных вод и удельного химического выноса веществ с водосборной территории. Установлено, что выпадение минеральных и органических веществ с атмосферными осадками на сушу незначительное. В то же время атмосферные осадки являются основным источником поступления в поверхностные воды хлоридов, большей частью SO_4^{2-} , $\text{P}_{\text{общ}}$, аммония, нитратов, а также тяжелых металлов.

Ключевые слова: атмосферные осадки, поверхностные воды, химический состав природных вод.

I. Yu. Potapova. THE ROLE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN THE FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF SURFACE WATERS IN KARELIA

The role of atmospheric precipitation in the formation of the chemical composition of Karelian surface waters is considered by two methodological approaches. The contribution of the atmospheric constituent to the chemical balance of surface waters was estimated using long-term data of the chemical composition of precipitation taking into account the composition of surface waters and specific chemical carry-over of substances from the catchment area. We found that the input of mineral and organic substances with atmospheric precipitation on land is insignificant. Precipitation is a source of nutrients, especially ammonium, nitrate, mineral and total phosphorus and heavy metals.

Key words: atmospheric precipitation, surface waters, chemical composition of natural water.

Введение

Атмосферные осадки играют важную роль в формировании химического состава природных вод. С одной стороны, атмосферные

осадки являются непосредственным источником поступления в водоемы многих химических элементов, с другой – именно взаимодействие осадков с почвами и породами на водосборе приводит к дополнительному обогащению при-

родных вод химическими веществами. Выяснение роли осадков в формировании химического состава природных вод имеет большое значение для понимания функционирования водных экосистем севера. Эту оценку можно провести с использованием двух методических подходов: 1) с учетом коэффициента изменения концентрации веществ в атмосферных осадках в зависимости от величины осадков и испарения, как это было выполнено С. П. Китаевым для различных климатических зон [Китаев, 2007] и 2) с учетом данных о среднем удельном выносе веществ с водосборной территории в сравнении с химическими выпадениями с атмосферными осадками для Карельского гидрографического района [Лозовик и др., 2005]. Эти методические подходы имеют разную основу, и представляло определенный интерес их сравнить и выяснить вклад атмосферной составляющей в химический баланс поверхностных вод Карелии.

Материалы и методы

Для оценки роли атмосферных осадков в формировании химического состава поверхностных вод использовались многолетние данные об их химическом составе (1996–2010 гг.). Материалы наблюдений за период с 1996 по 2006 г. [Состояние..., 2007] дополнены новыми результатами исследований (2007–2010 гг.). Атмосферные осадки отбирались в период максимального снегонакопления на участках, удаленных от промышленных центров. Всего было отобрано 256 проб. Для анализа многолетних данных по химическому составу и расчета химических выпадений веществ территория Карелии была разделена на четыре участка: северный – от северной границы республики до пос. Надвоицы, центральный – от пос. Надвоицы до г. Медвежьегорска, южный – от г. Медвежьегорска до южной границы Республики Карелия, восточный – от восточного побережья Онежского озера до восточной границы республики, которые отличаются между собой по количеству и химическому составу осадков [Лозовик, Потапова, 2006]. Для каждого из указанных участков была проведена статистическая обработка данных и рассчитаны среднеарифметические, среднегеометрические и медианные значения химических показателей. Расчет химических выпадений был выполнен с использованием медианных концентраций за многолетний период. Количество осадков оценивалось по среднегодовым данным: для северного района – 520, центрального – 590, южного – 650, восточного – 600 мм/год [Атлас..., 1989; Онежское озеро..., 2010]. Расчет

средних химических выпадений для всей территории Карелии выполнен как среднеарифметическое из четырех значений для северного, центрального, южного и восточного районов.

Для поверхностных вод учитывались среднестатистические (медианные) показатели содержания веществ [Платонов, Лозовик, 2003; Лозовик, 2006]. Удельный вынос веществ с водосборной территории Карелии был принят по данным авторов [Лозовик и др., 2005].

Расчет доли атмосферной составляющей в химическом составе поверхностных вод проводился по соотношению химических выпадений и удельного химического стока и по формуле:

$$\rho = \frac{KC_{ос.}}{C_{пов. вод}} \cdot 100\% ,$$

где $C_{ос.}$, $C_{пов. вод}$ – концентрация вещества в атмосферных осадках и в поверхностных водах; K – коэффициент изменения концентрации веществ в атмосферных осадках в зависимости от величины осадков и испарения.

Для Карелии коэффициент K принят равным 2 согласно данным С. П. Китаева для зоны тайги [Китаев, 2007].

Результаты и обсуждение

Данные по химическому составу атмосферных осадков на территории Карелии за период 1996–2010 гг. представлены в таблице. Здесь приведены и медианные показатели для поверхностных вод, химические выпадения и удельный химический вынос веществ с водосборной территории по данным работ [Платонов, Лозовик, 2003; Лозовик и др., 2005; Лозовик, 2006; Состояние..., 2007].

Сравнение данных таблицы показывает, что в атмосферных осадках на порядок меньше содержится K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , OB , Si и Fe , чем в поверхностных водах. Это указывает на то, что их поступление в поверхностные воды связано в основном с процессами выщелачивания на водосборной территории. В среднем с атмосферными осадками на сушу поступает $1,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ солей и такое же количество органического вещества. Содержание SO_4^{2-} , Cl^- , $P_{мин}$, $P_{общ}$, $N_{общ}$, а также Cu в поверхностных водах и атмосферных осадках находится в пределах одного порядка, но их концентрация в осадках меньше, чем в водных объектах. По ряду элементов – NO_3^- , NH_4^+ , Pb , Zn , Cd и Al – получено большее их содержание в атмосферных осадках, чем в поверхностных водах. Именно атмосферные осадки являются основным источником поступления на сушу минеральных форм азотистых веществ, но потребление их

Химический состав атмосферных осадков, поверхностных вод, химические выпадения и удельный вынос веществ с территории Карелии

Компонент	Размерность	Северный	Центральный	Южный	Восточный	Карелия		Химические выпадения	Удельный вынос
		Атмосферные осадки				Поверхностные воды			
K ⁺	мг/л	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,50	г/(м ² ·год)	
Na ⁺		0,17	0,29	0,14	0,10	0,18	1,30	0,03	–
Ca ²⁺		0,19	0,22	0,27	0,33	0,25	2,40	0,11	–
Mg ²⁺		0,04	0,05	0,06	0,05	0,05	1,10	0,15	–
SO ₄ ²⁻		0,72	0,74	0,81	0,52	0,70	2,50	0,03	–
Cl ⁻		0,44	0,75	0,43	0,37	0,50	1,2	0,41	–
Σ _и		1,89	2,35	2,10	1,61	1,99	19,4	0,29	–
Fe _{общ}		0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,43	1,18	7,8
Al		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	–
Si		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	1,70	0,01	0,18
ПО	мг О/л	1,06	1,22	0,84	0,62	0,94	12,0	г О/(м ² ·год)	
NH ₄ ⁺	мг N/л	0,08	0,08	0,11	0,01	0,08	0,05	1,09	8,5
NO ₂ ⁻		0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	г N/(м ² ·год)	
NO ₃ ⁻		0,19	0,18	0,24	0,20	0,20	0,01	0,04	0,025
N _{орг}		0,08	0,06	0,10	0,08	0,08	0,44	0,001	–
N _{общ}		0,34	0,34	0,47	0,44	0,40	0,50	0,12	0,015
Pb	мкг/л	0,60	0,50	0,50	–	0,50	0,10	0,05	0,14
Zn		9,10	7,30	7,50	–	8,0	2,65	0,24	0,18
Cd		0,05	0,05	0,08	–	0,06	0,03	0,01	–
Cu		0,70	0,80	0,70	–	0,70	1,40	0,04	–
P _{мин}		1,0	1,0	3,0	1,0	1,50	2,0	0,43	–
P _{общ}		7,0	10,0	8,0	11,0	9,0	17,0	0,001	–
								0,006	0,007

Примечание. Прочерк – нет данных.

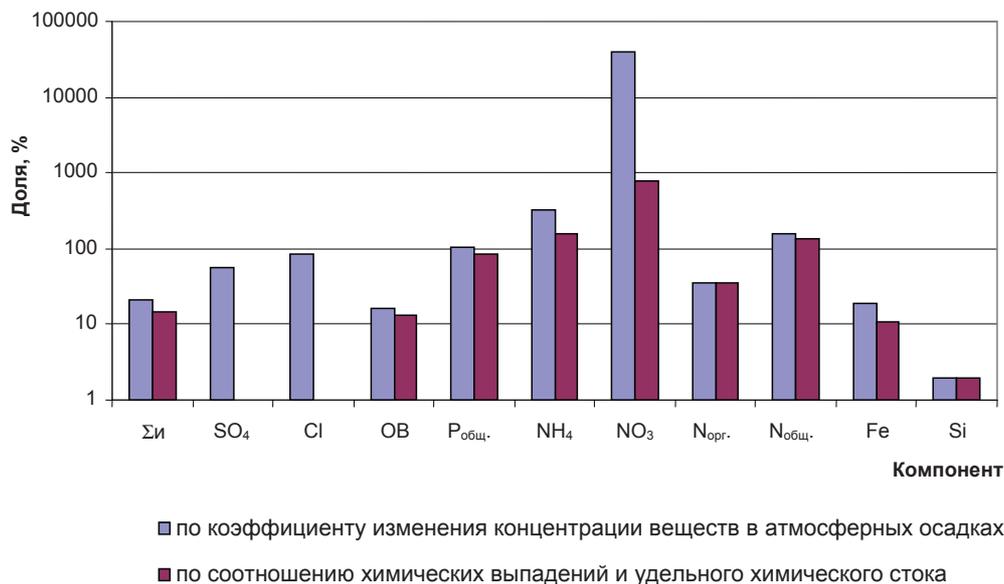
водной растительностью и водными организмами приводит к утилизации и, соответственно, к низкому содержанию этих веществ в поверхностных водах.

Значительное содержание Pb, Zn, Cd в атмосферных осадках связано с большим количеством их антропогенных источников. В то же время высокая удерживающая способность почв к ним приводит к тому, что они не поступают в водные объекты, а задерживаются на водосборной территории.

Более наглядную картину роли атмосферных осадков в формировании состава поверхностных вод дает оценка доли содержания компонентов атмосферных осадков в поверхностных водах по коэффициенту изменения концентрации веществ в атмосферных осадках в зависимости от величины осадков и испарения и по отношению химических выпадений и удельного химического стока (рис.). Из рисунка видно, что вклад атмосферной составляющей в поступление Si, Fe, минеральных (по Σ_и) и органических веществ в поверхностные воды несуществен. С учетом испарения доля минеральных и органических веществ достигает 21 %. В то же время поступление Cl⁻, большей частью SO₄²⁻, а также P_{общ} связано в основном с атмосферными осадками. Так, доля SO₄²⁻, Cl⁻ в среднем составила 56 и 83 % соответственно.

Содержание общего азота в атмосферных осадках и поверхностных водах имеет близкие значения, что связано с постоянством общего азота в объектах гидросферы [Лозовик, Бородулина, 2009]. Отличие заключается в том, что в атмосферных осадках преобладают неорганические формы азота (NH₄⁺, NO₃⁻), а в поверхностных водах, за редким исключением, – органические. Поэтому для этих компонентов формальный расчет их доли дает очень высокие значения. Аммоний и нитраты активно потребляются на суше и в воде, и как следствие этого наблюдаются низкие их концентрации в поверхностных водах. Аналогичная картина в соотношении отмечается для тяжелых металлов (Pb, Zn, Cd) и Al. Вынос их в поверхностные воды ограничен удерживающей способностью почв.

Расчетная доля химических элементов по С. П. Китаеву закономерно выше, чем по соотношению выпадений и удельного химического стока. Связано это с тем, что удельный химический сток был рассчитан по данным для речных систем, а сравнение концентраций проводилось по среднерегionalным величинам для поверхностных вод, включая реки и озера. Для последних на составе воды сказывается выпадение атмосферных осадков, и как следствие этого концентрация веществ в озерах несколько меньше, чем в приточных водах.



Доля компонентов атмосферных осадков в химическом составе поверхностных вод Карелии, %

Выводы

На основании проведенных исследований с использованием двух методических подходов установлено, что атмосферные осадки играют существенную роль в формировании химического состава поверхностных вод. Поступление минеральных и органических веществ с атмосферными осадками на сушу незначительное – до 1,2 г/(м²·год). С учетом испарения доля солей и органических веществ атмосферных осадков в минерализации поверхностных вод Карелии достигает 21 %. Наибольшую долю из минеральных компонентов вносят Cl⁻ (83 %) и SO₄²⁻ (56 %). С атмосферными осадками на сушу поступает значительное количество аммония, нитратов, минерального и общего фосфора. Выпадение общего азота несколько выше, чем выносятся его с водосборной территории. А органического азота – меньше, чем поступает с речными водами. Это связано с потреблением аммония и нитратов наземной растительностью, переходом их в органические формы. С атмосферными осадками на сушу поступает значительное количество Pb, Zn и Cd, но их вынос в водные объекты ограничен.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Потапова Ирина Юрьевна

научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: irina_potapova@inbox.ru
тел.: (8142) 576541

Литература

- Атлас Карельской АССР*. М.: ГУГК СССР, 1989. 40 с.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 125–131.
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 59 с.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.
- Лозовик П. А., Басов М. И., Литвиненко А. В. Оценка поступления химических веществ в гидрографическую сеть с водосборной территории Карелии // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 584–588.
- Онежское озеро*. Атлас. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. С. 75–81.
- Платонов А. В., Лозовик П. А. Тяжелые металлы в природных водах Карелии // Гидроэкологические проблемы и использование водных ресурсов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2003. С. 135–144.
- Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг.* Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 210 с.

Potapova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: irina_potapova@inbox.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 574.589: (470.2: 556.55)

СТРУКТУРА КРИОФИТОНА* В ОЗЕРАХ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА

Ю. Л. Сластина¹, С. Ф. Комулайнен², М. С. Потахин¹,
М. А. Клочкова³

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

² Институт биологии Карельского научного центра РАН

³ Петрозаводский государственный университет

Цель данной работы – сравнительное изучение структуры альгоценозов льда (криофитона) в водоемах, расположенных на территории города Петрозаводска. Отмечены различия в структуре альгоценозов льда в январе и апреле. Структура криофитона сформирована видами, доминирующими в фитопланктоне исследованных озер. Отмечено заметное различие в видовом составе и биомассе альгоценозов верхнего и нижнего слоев льда.

Ключевые слова: криофитон, озера, видовой состав, биомасса альгоценозов.

Yu. Slastina, S. Komulainen, M. Potakhin, M. Klochkova. CRYOPHYTON STRUCTURE IN LAKES OF THE PETROZAVODSK CITY

The aim of the report is to compare the structure of algal coenoses formed in the ice (cryophyton) in the water bodies located in the Petrozavodsk city area. The algal coenoses in ice in January and April show differences in the species composition and quantitative parameters. The ice flora consisted of about the same species as the plankton flora. The upper and lower ice layers were found to differ markedly in the species composition and biomass.

Key words: cryophyton, lakes, species composition, biomass, communities.

Введение

Важность льда в природных процессах, протекающих в водоемах, не вызывает сомнения [Algae and Cyanobacteria..., 2007; Salonen et al., 2009]. Показано, что формирование и разрушение льда влияет на состав, структуру и функционирование сообществ всех водных организмов, включая водоросли [Кузьмин, Балон, 1974; Лаврентьева, 1981; Оболкина и др.,

2000; Бондаренко, Щур, 2008]. Несмотря на то что практически все водоемы в России зимой покрыты льдом, работ, в которых анализируется структура и функционирование экосистем льда, в том числе криофитона, очень немного.

В Карелии водоемы могут находиться под льдом с середины ноября до середины мая [Ефремова и др., 2010]. Таким образом, мы ничего не знаем о жизни водных организмов в течение семи месяцев. Предполагается, что сообщества водных организмов зимой находятся в состоянии покоя и поэтому исследования в течение этого периода необязательны.

* Криофитон – холодолюбивые водоросли, развивающиеся на поверхности подтаявшего снега и во льду (Ботаника. Водоросли. Экология. [Электронный ресурс]).

Отсутствие корректных данных о функционировании водорослей зимой затрудняет теоретические обобщения, связанные с анализом продукционного потенциала водоемов.

Цель данной работы – сравнительное изучение структуры альгоценозов криофитона в водоемах, расположенных на территории города Петрозаводска. Таким образом, мы стремились получить фоновые данные о структуре и динамике криофильной альгофлоры для последующего их использования при организации экологического мониторинга в импактных районах.

Материалы и методы

Для исследований были выбраны озера, расположенные на территории г. Петрозаводска (60°05' с. ш., 34°10' в. д.), хорошо известные рыбакам и отдыхающим, но практически не изученные. Отбор проб проводили в зимний сезон 2009–2010 гг. Несмотря на близость расположения исследованных водоемов, они заметно отличаются по своему происхождению, морфометрическим и гидрологическим характеристикам.

Озеро Ламба (площадь 1,4 га, объем – $0,047 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, средняя глубина – 3,4 м) относится к типичному для Фенноскандии типу небольших лесных озер, часто без видимого стока, для которых характерны близкие к нейтральным значения pH (6,9) и высокое содержание гумуса. Озеро Четырехверстное (площадь 11,8 га, объем – $0,373 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, средняя глубина – 3,2 м) тоже когда-то было лесным озером, но оно находится в жилой зоне, долгое время использовалось для водоснабжения небольшой обувной фабрики. Озеро Карьер заметно отличается от двух первых озер [Старцев, Коваленко, 1989]. На его месте до 1980 г. находилась открытая горная выработка площадью 27 га и глубиной до 45 м. После прекращения добычи камня образовался водоем длиной 580 м, глубиной до 13 м и площадью 13,6 га.

Сезонная динамика химического состава в озерах также специфична. В оз. Карьер химический состав воды в течение зимы практически не изменяется. В оз. Четырехверстном отмечено незначительное повышение содержания фосфора, снижение pH (от 8,4 до 7,2) и цветности. В оз. Ламба с ноября по апрель концентрация фосфора и электропроводность снижается более чем в два раза (табл. 1).

Для изучения альгофлоры выпиливали блоки льда размером 40 · 40 см и отрезали его нижний и верхний слои с таким расчетом, чтобы объем пробы составил около 5 л.

Таблица 1. Сезонная динамика химического состава воды исследованных водоемов

Озеро	30.10.2009	17.01.2010	03.04.2010
	P _{total} , mg P/l		
Ламба	0,104	0,104	0,042
Четырехверстное	0,008	0,023	0,027
Карьер	0,023	0,008	0,011
	E, $\mu\text{k Sm/cm}$		
Ламба	124,7	144,9	76,3
Четырехверстное	196	196,5	209
Карьер	402	405	404
	Pt° grad.		
Ламба	176	98	45
Четырехверстное	64	41	30
Карьер	5	4	5

Пробы для таксономического анализа фиксировали 40%-м формалином, концентрировали методом прямой фильтрации через мембранные фильтры «Владипор» с диаметром пор 0,9–1 мкм до 10–15 мл, в дальнейшем сгущая пробу до 5 мл отстаиванием. Просчет проб проводили под световым микроскопом в 5-кратной повторности в камере Нажотта объемом 0,02 мл. Определение пигментов проводили в смешанном 90%-м ацетоновом экстракте. Концентрации хлорофиллов *a*, *b* и *c* рассчитывали по уравнениям, приведенным в руководстве [Report of SCOR-UNESCO, 1966].

Результаты и обсуждение

Озера покрылись льдом в конце ноября 2009 г. Нарастание льда в течение зимнего периода происходит неравномерно: более интенсивный прирост наблюдается в начальный период ледостава – в ноябре, декабре. После образования снежного покрова интенсивность прироста замедляется. Продолжительность ледостава составила 125–130 дней. К середине января толщина льда достигла 40–50 см. Толщина снежного покрова колебалась от 20 до 30 см.

В пробах льда определено 27 видов водорослей, из которых Bacillariophyta представлена 4, Chlorophyta – 14, Cyanophyta – 7 и Euglenophyta – всего 2 видами. Альгофлору льда формируют виды, доминирующие в планктоне исследованных озер [Антипина, Комулайнен, 2010; Komulaynen, Slastina, 2010]. Во все периоды наблюдения структура альгоценозов льда в исследованных озерах заметно различалась как по видовому составу, так и по количественным параметрам (табл. 2, 3).

В январе альгоценозы льда были наиболее разнообразны в оз. Четырехверстном. Среди доминирующих видов встречены диатомовые (*Tabellaria flocculosa*), зеленые (*Aphanochaete repens*, *Chlorella vulgaris*), сине-зеленые

Таблица 2. Доминирующие водоросли криофитона в верхнем и нижнем слоях льда

Слой	Озеро		
	Ламба	Четырехверстное	Карьер
17.01.2010			
Верхний	<i>Microcystis aeruginosa</i> Kütz. <i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr.	<i>Aphanochaete repens</i> A. Braun. <i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz. <i>Phormidium tenue</i> A. Braun.	<i>Microcystis aeruginosa</i> Gom. <i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz.
Нижний	<i>Coelastrum microporum</i> Näg. <i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr.	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. <i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr.	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz. <i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.
03.04.2010			
Верхний	<i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr.	<i>Planktothrix agardhii</i> (Gom) An. <i>Gomposphaeria</i> sp.	<i>Stephanodiscus asterea</i> (Ehr.) Grun. <i>Synedra splendens</i> Kütz.
Нижний	<i>Aphanocapsa</i> sp. <i>Coelosphaerium</i> sp.	<i>Planktothrix agardhii</i> <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (L.) Ralfs.	<i>Coelosphaerium naegelianum</i> Ung. <i>Anabaena</i> sp.

(*Phormidium tenue*) и эвгленовые (*Trachelomonas volvocina*) водоросли. Обилие варьировало от 3,4 до 22,7 тыс. кл./л, биомасса – от 1,1 и 10,3 мг/м³ и концентрация хлорофилла *a* – от 1,2 до 1,8 мг/м³.

Таблица 3. Количественная характеристика криофитона исследованных водоемов в январе 2010 г.

Озеро	Число видов	Численность, тыс. кл./л	Биомасса, мг/м ³	Хлорофилл <i>a</i> , мг/м ³
Четырехверстное	10/15	3,40/22,67	1,09/10,32	1,18/1,87
Ламба	9/3	6,80/7,52	1,82/9,36	1,02/0,45
Карьер	12/4	3,53/1,73	3,08/3,42	0,47/0,48

Видовое разнообразие водорослей во льду озер Карьер и Ламба было ниже. В оз. Карьер доминировали только диатомовые водоросли *Tabellaria fenestrata* и *T. flocculosa*. Обилие варьировало от 1,7 до 8,2 тыс. кл./л, а хлорофилл *a* – от 1,2 до 1,8 мг/м³. Биомасса была близка к отмеченной в оз. Четырехверстное: 1,8–9,36 мг/м³.

Обследование озер проводилось также в начале апреля. Весь март стояла солнечная погода. Снег на озерах спрессовался. Поверхность снежного покрова была стекловидной от подтаивания. Толщина льда достигала 50 см. Количественные показатели ледовых сообществ во всех озерах снизились, хотя количество видов несколько возросло. Наблюдались и изменения в структуре доминирующего комплекса видов. Особенно заметно, от 3 до 10 раз, снизилась плотность водорослей во льду оз. Карьер. Концентрация хлорофилла *a* в верхнем и нижнем слоях здесь составила соответственно 0,15 и 0,04 мг/м³. В оз. Четырехверстное в апреле концентрация хлорофилла *a* изменялась от 0,69 до 0,56 мг/м³, а в оз. Ламба – от 0,87 до 0,39 мг/м³ соответственно в верхнем и нижнем слоях льда.

Структура криофитона заметно изменялась с глубиной как по видовому составу, так и по численности и биомассе формируемых группировок (табл. 2, 3).

Максимальная численность и биомасса водорослей в оз. Четырехверстное наблюдалась в нижнем слое. В оз. Ламба максимальная биомасса было отмечена в верхнем слое льда. В оз. Карьер структура криофитона с глубиной практически не меняется.

Выводы

Альгофлору льда формируют виды, доминирующие в планктоне исследованных озер в период открытой воды.

Обилие водорослей в криофитоне определялось глубиной водоемов и уровнем их трофности.

Для криофитона исследованных озер характерна вертикальная дискретность видового состава и биомассы.

Мониторинг озер зимой нельзя ограничить подледной водой, так как процессы, происходящие во льду, могут быть не менее, а даже более существенны. Особое внимание следует обращать на его функционирование в первой половине зимы и накануне разрушения ледового покрова.

Литература

Антипина Г. С., Комулайнен С. Ф. Водоросли // Растения и лишайники города Петрозаводска (аннотированные списки видов): Учеб. пособие / Под ред. Г. С. Антипиной. Петрозаводск: Петр ГУ, 2010. С. 13–43.

Бондаренко Н. А., Щур Л. А. Cryptophyta водоемов и водотоков Восточной Сибири (Россия) // Альгология. 2008. № 4. С. 408–422.

Ботаника. Водоросли. Экология. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://botany.pp.ru/sistemplant/algae/ecology/>, свободный.

Ефремова Т. В., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И. Ледовый режим озер Карелии // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. С. 31–40.

Кузьмин Г. В., Балонов И. М. О подледном цветении воды Рыбинского водохранилища // Информ. бюл. Ин-та биологии внутренних вод АН СССР. 1974. С. 18–28.

Лаврентьева Г. М. Особенности развития зимнего фитопланктона в малых озерах северо-запада // Изв. ГосНИОРХ. 1981. 162. С. 89–103.

Оболкина Л. А., Бондаренко Н. А., Дорощенко Л. Ф. и др. О находке криофильного сообщества в озере Байкал // ДАН. 2000. 371 (6). С. 815–817.

Старцев Н. С., Коваленко В. Н. Исследование водных ресурсов Карелии // Операт.-информ. материалы. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1989. С. 37–41.

Algae and Cyanobacteria in Extreme Environment / Ed. by Joseph Seckbach. Springer, 2007. 812 p.

Komulainen S., Slastina J. Winter algae communities in the lakes and rivers ecosystems (Republic of Karelia, North Russia) // Proceedings of 2nd Winter Limnology Symposium. Berlin, 2010. P. 12–13.

Report of SCOR-UNESCO working group 17. Determination of photosynthetic pigments // Monographs on oceanographic methodology. Determination of photosynthetic pigments in water. UNESCO. 1966. P. 9–16.

Salonen K., Leppäranta M., Viljanen M., Gulati R. D. Perspectives in winter limnology: closing the annual cycle of freezing lakes // Aquat. Ecol. 2009. 43. P. 609–616.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сластина Юлия Леонидовна

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: slastina.jul@yandex.ru
тел.: (8142) 576520

Потакхин Максим Сергеевич

младший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: potakhin@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

Комулайнен Сергей Федорович

ведущий научный сотрудник, д. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: Komsf@rmail.ru
тел.: (8142) 769810

Клочкова Марина Александровна

Петрозаводский государственный университет
ул. Красноармейская, 31, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: voro52@yandex.ru

Slastina, Yulia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: slastina.jul@yandex.ru
tel.: (8142) 576520

Potakhin, Maksim

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: potakhin@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

Komulainen, Sergey

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Komsf@mail.ru
tel.: (8142) 769810

Klochkova, Marina

Petrozavodsk State University
31 Krasnoarmeyskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: voro52@yandex.ru

ЭКСПЕДИЦИИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

В период с декабря 2010 г. по апрель 2011 г. Институтом водных проблем Севера Карельского НЦ РАН проводились исследования антарктических озер по гранту РФФИ «Реакция озер на изменения климата» № 10-05-00963, руководитель – Н. Н. Филатов. Работы проводились в составе 56-й Российской антарктической экспедиции Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. Изучались разнотипные озера (постоянно и временно покрытые ледяным покровом), расположенные в трех оазисах: Холмы Тала, Ширмахер, Холмы Ларсеманн.

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей изменений режима озер, покрытых льдом, в разных физико-географических условиях под влиянием климата. В задачи исследования входило изучение изменчивости гидрофизических параметров – сезонной и многолетней (сравнение с предыдущими исследованиями); изучение изменчивости концентраций биогенных элементов и особенностей структуры биологических сообществ озер; исследование вертикальной структуры донных осадков.

Исследовано 27 озер, для каждого из которых выполнены гидрофизические измерения, собрано 38 проб фитопланктона, 22 – зоопланктона, 47 колонок донных отложений, 18 – для

анализа содержания хлорофилла *a*, 28 проб для комплексного гидрохимического анализа, а также 5 проб лишайников на исследование их биоаккумулятивной способности.

Полный видовой состав, количественные характеристики фитопланктона, зоопланктона и микробного донного сообщества, а также динамика содержания хлорофилла *a* в планктоне и химический состав воды и донных отложений будут проанализированы при камеральной обработке собранного материала в лабораториях Института водных проблем Севера КарНЦ РАН и в специализированных подразделениях ведущих научных центров России.

После камеральной обработки данных микробиологического и молекулярно-биологического анализа донных осадков озер трех антарктических оазисов и частиц аллохтонного вещества из материкового льда оазиса Ширмахера предполагается получить сведения о современном состоянии озер, а сравнение этих данных с ранее проведенными исследованиями даст возможность оценить влияние изменений климата на озера антарктических оазисов.

А. В. Толстикова, А. Н. Шаров

EXPEDITION OF THE RESEARCH OF EASTERN ANTARCTICA LAKES

The research of Antarctic lakes performed by the Northern Water Problems Institute (Karelian Research Centre of RAS) in the work of 56 Russian Antarctic Expedition of the Arctic and Antarctic Research Institute in the period from December 2010 to April 2011. It was studied the lakes located in the three oases: Thala Hills, Schirmacher, Larsemann Hills. Office studies of the material is

expected to get new information about climate variability of the Antarctic oases, using data from the microbiological and molecular biological analysis of bottom sediments of lakes of three Antarctic oases and allochthonous particulates from the continental ice of Schirmacher Oasis.

A. V. Tolstikova, A. N. Sharov

ЭКСПЕДИЦИЯ «ИСТОРИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПАМЯТНИКИ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ»

С 28 июня по 16 июля 2010 г. проходила экспедиция по гранту Русского географического общества. Организатор – Отделение Русского географического общества в Республике Карелия и Институт водных проблем Севера Карельского НЦ РАН. В работе экспедиции приняли участие институты КарНЦ РАН: водных проблем Севера; языка, литературы и истории; геологии, а также Карельская государственная педагогическая академия и историко-культурный центр «Полярный Одиссей».

Цель экспедиции заключалась в исследовании современного состояния историко-географических памятников Европейского Севера России. Под историко-географическими памятниками в данном случае понимается сочетание природных и культурно-исторических объектов – природно-культурных комплексов. Задачи включали: исследование современного состояния историко-географических памятников по маршруту Онежское озеро – Беломорско-Балтийский канал – Белое море и Ладожское озеро; проведение ландшафтных исследований геоконплексов; исследование подводной части геоконплексов с целью обнаружения новых петроглифов; оценку экологического состояния береговых геоконплексов; оценку рекреационной привлекательности природно-культурных комплексов.

В экспедиции были проведены специальные физико-географические, исторические и археологические исследования; документированы 14 объектов – памятников природы, истории и культуры, сделаны новые археологические находки: найдены новые петроглифы на восточном берегу Онежского озера, в районе Залавруга на Белом море и исследованы объекты, перспективные для обнаружения ранее не изученных петроглифов.

По результатам экспедиции в Президиум Русского географического общества представлен научный отчет, включающий оценку современного состояния природных и культурно-исторических объектов Онежского и Ладожского озер, Белого моря. Было создано два документальных фильма: петербургским телеканалом «Телепутешествия» (автор О. Кузьмичев) и студией Карельской государственной педагогической академии (автор О. Чупин). Выпущен фотоальбом «Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер: по маршруту экспедиции Русского географического общества „Историко-географические памятники Европейского Севера России“» / [Отд-ние РГО в Респ. Карелия, Ин-т водных проблем Севера КарНЦ РАН; фото: Игорь Георгиевский]. – Петрозаводск: Verso, 2010. – 95 с.: ил.». Издан Атлас «Онежское озеро» / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 151 с.

Исследования по гранту Русского географического общества показали, что современное состояние практически всех изученных памятников Европейского Севера России требует введения дополнительных охранных и восстановительных мероприятий, поскольку существующие статусы не в полной мере отвечают требованиям или не соблюдаются населением, а в ряде случаев и ответственными за это организациями.

*М. С. Богданова, И. Ю. Георгиевский,
С. П. Гриппа, В. Л. Дмитриев,
Н. В. Лобанова, П. В. Медведев,
М. С. Потахин, С. Б. Потахин, А. В. Толстиков, Н. Н. Филатов*

THE EXPEDITION OF THE GRANT OF RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

The expedition «Historical and geographical sites of the European North of Russia» of the grant of the Russian Geographical Society took place from June 28 to July 16, 2010. Organizer – Karelian Branch of the Russian Geographical Society and Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre RAS. In the work of the expedition was attended institutions of the Karelian Research Centre: Northern Water Problems; Language, literature and history; Geology; Karelian State Pedagogical Academy, historical and cultural

center «Polar Odyssey». The current state of almost all studied sites requires the introduction of additional security and reconstruction activities, as the existing status does not fully meet the requirements or not complied with the population, and in some cases, the responsible organizations.

*M. S. Bogdanova, I. U. Georgievskiy,
S. P. Grippa, V. L. Dmitriev, N. V. Lobanova,
P. V. Medvedev, M. S. Potakhin,
S. B. Potakhin, A. V. Tolstikov, N. N. Filatov*

ЮБИЛЕИ И ДАТЫ

ЗАЛМАН САМУИЛОВИЧ КАУФМАН (к 90-летию со дня рождения)



Залман Самуилович Кауфман родился 10 января 1921 г. в г. Чернигове. Окончил украинскую школу. В раннем детстве проявил большую любовь к природе. Первую статью опубликовал будучи учеником шестого класса в журнале «Юный натуралист». Статья обратила на себя внимание крупного биолога, эколога, писателя и художника, профессора Московского университета А. Н. Формозова, который помогал З. Кауфману все его школьные годы сформироваться как исследователю, будущему ученому.

Окончив школу и выдержав труднейшие вступительные экзамены, З. С. Кауфман был зачислен в число студентов биофака Ленинградского государственного университета. Однако учиться не пришлось, так как началась война с Фин-

ляндией и З. С. Кауфман был призван в армию. После финской войны службу проходил в 1-й Московской пролетарской дивизии – элитной воинской части. После прохождения в 1941 г. майского парада по Красной площади, дивизия была отправлена в Западную Белоруссию, на советско-германскую границу, где его и застала война. Тяжелые кровавые бои, чудовищные потери, тягостное отступление вплоть до Подмоскovie. Из многотысячного подразделения осталось лишь три десятка человек. В качестве командира отделения разведки и артиллерийского корректировщика участвовал в боях на Волховском и Ленинградском фронтах. Был ранен и контужен, в 1944 г. по инвалидности демобилизован. После демобилизации вновь стал студентом Ленинградского университета.

С первого курса специализировался на кафедре зоологии беспозвоночных животных у член-корр. АН СССР профессора В. А. Догеля, а со второго курса – дополнительно и на кафедре эмбриологии у член-корр. П. Г. Светлова. Весь университетский курс прошел за четыре года, оставив пятый курс для научной работы, но университет закончить не пришлось. В то время проходили жестокие дискуссии по вопросам ревизии фундаментальных положений в разных науках, в частности в генетике. Те, кто были не согласны с официальной линией, подвергались репрессиям. В это же время в стране была развернута компания антисемитизма. З. С. Кауфман, выступая на различных конференциях и форумах, не скрывал своего несогласия с происходящим. Реакция властей была незамедлительной. Зимой 1948 г. органами Ленинградского МГБ он был арестован. Обвиненный в клевете на советскую науку, на советский строй, а также в сионистской деятельности, З. С. Кауфман был осужден на 25 лет лагерей особо строгого

режима (каторжных) с последующим поражением в избирательных правах на пять лет. Срок отбывал в спецлагерях Тайшетлага и Северного Урала на тяжелых физических работах. Отсидев семь лет, после смерти Сталина был реабилитирован и снова восстановлен в университете, который, наконец, и закончил. По сохранившимся на кафедре материалам, опубликовал две статьи в «Докладах АН СССР». Выдержав конкурс, был зачислен в аспирантуру Зоологического института АН СССР к академику А. В. Иванову. Диссертация была посвящена изучению развития, строения и эволюции трахейной и пищеварительной систем хилопод. Выработка собственной методики сделала возможным досрочное выполнение темы. Защита проходила на Ученом совете биофака Ленинградского университета. Успешная защита, большое количество статей, ссылки на них многих видных специалистов, приглашения на международные конференции не лишили З. С. Кауфмана длительной, мучительной и унижительной безработицы. Мешали анкетные данные. Приютила недавно организованная и нуждающаяся в квалифицированных научных кадрах Беломорская биологическая станция Карельского филиала АН СССР, где ему предстояло заниматься вопросом катастрофического падения численности беломорской сельди. Предложенные З. С. Кауфманом впервые в мировой практике искусственные нерестилища в условиях моря сделали возможным сохранение беломорской егорьевской сельди как вида.

После расформирования Карельского филиала АН СССР существование Беломорской станции оказалось под угрозой. Благодаря огромным усилиям З. С. Кауфмана станция была сохранена и передана Зоологическому институту АН СССР. Этот переход изменил и тематику исследований. З. С. Кауфман занялся изучением половых циклов массовых видов беломорских беспозвоночных. Исследование было поставлено широко и многогранно с использованием различных современных методов. Изучались не только видовые особенности половых циклов (50 видов), но и их адаптации к экологическим условиям высоких широт. До этого изучение половых циклов такого масштаба не проводилось. Эта работа легла в основу докторской диссертации, успешно защищенной на Ученом совете биофака Ленинградского университета. После восстановления Карельского филиала АН СССР З. С. Кауфман возвратился на работу в Отдел водных проблем, позже Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. Это снова повлекло за собой изменение тематики. Первое время

он занимался вопросом влияния токсикантов на процесс развития пресноводных гидробионтов и влияния на них различных адаптогенов. Но позже ему было предложено научное руководство большой темой, связанной с комплексным изучением Онежского озера. Этой работе было посвящено более 25 лет. Был создан большой и сильный научный коллектив. Ряд исследований проводились вместе с Зоологическим институтом АН СССР, с Институтом озероведения АН СССР, Институтом водных проблем АН СССР и Вычислительным центром АН СССР. Именно работе этого коллектива наука обязана всесторонним и детальным изучением Онежского озера – одного из крупнейших водоемов Европы, входящего в число Великих озер мира. Результаты исследований были изложены в многочисленных докладах, статьях, сборниках и диссертациях. Эти работы пользовались и пользуются большим авторитетом не только в нашей стране, но и далеко за ее рубежами. В этом несомненная заслуга З. С. Кауфмана.

Хорошее образование, большая эрудиция, высокая общая культура и удивительная работоспособность дали возможность З. С. Кауфману опубликовать 11 монографий и около 200 статей не только по разным вопросам современной биологии, но по иудаике и культуроведению, а также ряд рассказов, пользующихся успехом у читателей. Кроме того, им написано более 300 отзывов и рецензий на различные публикации, статьи, диссертации.

З. С. Кауфман награжден многими боевыми и правительственными наградами, двумя почетными грамотами Президиума АН СССР, избран член-корреспондентом Академии естественных наук России, он Заслуженный деятель науки Карелии, избирался «Человеком года Карелии». В настоящее время работает ведущим научным сотрудником лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

Н. Н. Филатов, М. Т. Сярки

ВАЖНЕЙШИЕ НАУЧНЫЕ ТРУДЫ З. С. КАУФМАНА

МОНОГРАФИИ

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с. (соавтор и редактор).

Эмбриология рыб. М.: Наука, 1990. 272 с.

Очерк эволюции кишечнополостных. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1991. 156 с.

Первичнополостные черви (приапулиды, киноринхи, гастротрихи и волосатики). Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1992. 211 с.

Эволюция размножения пола. Т. 1. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1993. 252 с.; Т. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1994. 200 с.

Седентарный образ жизни. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2000. 42 с.

Акантоцефалы. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2000. 122 с.

Оогенез рыб Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2003. 122 с. (Совместно с Ю. Н. Шаровой, А. А. Лукиным.)

Происхождение биоты континентальных водоемов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. 258 с.

СТАТЬИ

Очерки по морфологии хилопода (трахейная и пищеварительная системы): Дис. ... канд. биол. наук. Л., 1961.

Применение искусственных нерестилищ для беломорской сельди // Вопросы ихтиологии. 1965. Т. 5, вып. 3. С. 478–482. (Совместно с М. Н. Русановой.)

Некоторые вопросы фенольной интоксикации *Enchytraeus albidus* Henle (*Oligochaeta*) с точки зрения теории стресса // Гидробиол. журн. 1974. Т. 11, № 5. С. 62–65.

Зависимость оогенеза морских шельфовых беспозвоночных от температуры воды // Журн. общей биол. 1976. Т. 37, № 6. С. 912–916.

Экосистема Онежского озера и некоторые вопросы ее изменения // Водные ресурсы. 1989. № 4. С. 144–150. (Совместно с Г. П. Пирожковой.)

Некоторые вопросы регрессивной эволюции // Известия РАН. Серия биологическая. 2008. № 3. С. 369–378.

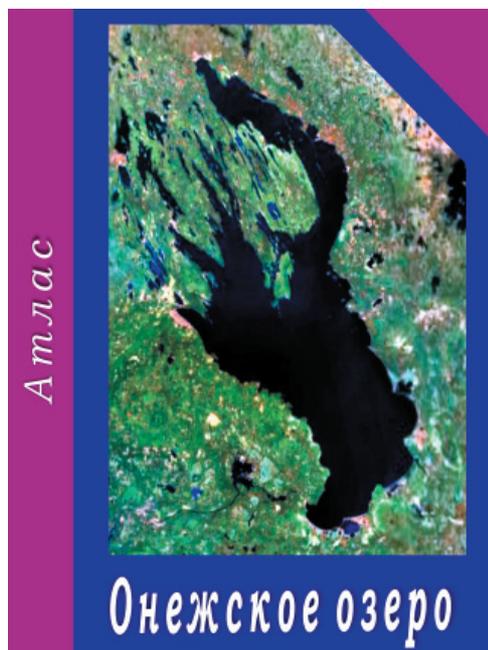
РЕЦЕНЗИИ И БИБЛИОГРАФИЯ

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 151 с.

В Атласе представлены результаты многолетних комплексных исследований Онежского озера, выполненных Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН при участии Института геологии КарНЦ РАН и Института озероведения РАН. В качестве прототипа был выбран атлас Ладожского озера (Ладожское озеро, 2002). В издании представлены схемы, диаграммы, графики, профили и тексты, которые показывают особенности формирования котловины озера и водосбора (в геологическом и историческом аспектах), современное состояние климата на водосборе, гидрологических и гидрофизических процессов (структура бассейна, уровенный режим и водный баланс озера, термический и ледовый режим, волны, сейши, сгонно-нагонные явления и т. п.), биоты (фито-, бактерио-, зоопланктон, макрозообентос, высшая водная растительность, ихтиофауна) и гидрохимических особенностей озера и водных объектов водосбора, а также донных отложений. Показаны памятники природы, культуры и истории. Большое внимание уделено практическому использованию вод озера, водному хозяйству, а также рекреационным особенностям озера и водосбора. Материалы Атласа представляют интерес для специалистов в практическом использовании ресурсов озера и водосбора, а также в научных и учебных целях, для студентов, аспирантов и людей, интересующихся природой Карелии. Работа издана при финансовой поддержке гранта ВОО «Русское географическое общество» за 2010 г. «Историко-географические памятники Европейского Севера».

Lake Onego. Atlas / Editor-in-charge N. N. Filatov. Petrozavodsk, 2010. 151 p.

The Atlas present the results of long-term multidisciplinary studies of Lake Onego carried out by the Northern Water Problems Institute with participation of the Institute of Geology (both of

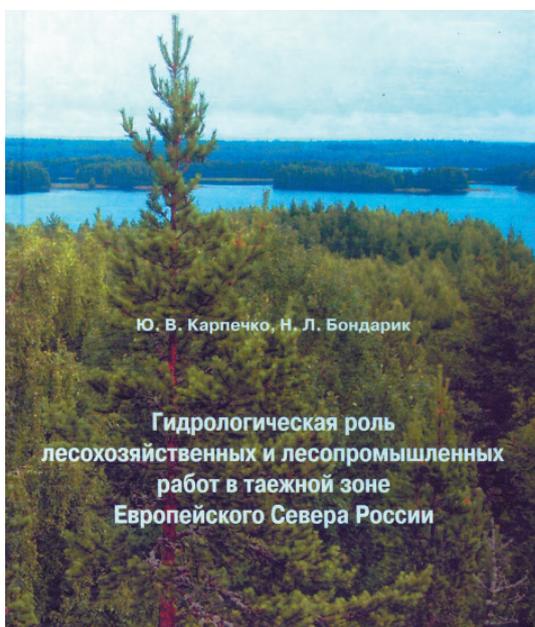


Karelian Research Centre, RAS) and the Institute of Limnology, RAS. The atlas of Lake Ladoga (Lake Ladoga, 2002) was chosen as the prototype. The volume comprises schemes, diagrams, graphs, profiles and texts demonstrating the patterns of formation of the lake basin and catchment (geological and historical aspects), modern climate in the catchment, hydrological and hydrophysical processes (structure of the drainage basin, level regime and water balance, temperature and ice regimes, waves, seiches, positive/negative surge, etc.), biota (phyto-, bacterio-, zooplankton, macrozoobenthos, higher aquatic vegetation, fish fauna), and hydrochemical characteristics of the lake and waters in the catchment, as well as of bottom sediments. Monuments of nature, culture and history are indicated. Much attention is paid to utilization of the lake water, the water economy, as well as to recreational features of the lake and the catchment. Materials included in the Atlas are of interest for specialists in management and utilization of the resources of the lake and the catchment, as well as for scientific and educational purposes, for university and PhD students, and for all those

keen on the nature of Karelia. The publication was supported by the Russian Geographical Society grant 2010 «Historical-geographical monuments of the European North».

Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 225 с.

Монография посвящена актуальным вопросам гидрологии – формированию речного стока в производных и коренных лесах. Приведена характеристика хозяйственной деятельности в лесу. Дано обоснование классификации лесов с точки зрения их гидрологической роли. Предложены методы расчета таксационных характеристик, необходимых для решения гидрологических задач. Рассмотрены методологические аспекты и предложены методы оценки изменения элементов водного баланса в результате лесопромышленной и лесохозяйственной деятельности (рубки главного пользования, рубки ухода, гидролесомелиорация). Предложены оригинальные методы расчета транспирации, испарения жидких и твердых атмосферных осадков с полога леса и испарения с наземного покрова. Рассмотрены особенности формирования элементов водного баланса в производных и коренных лесах и даны оценки гидрологической роли рубок главного пользования и рубок ухода, в том числе и в условиях изменения климатических характеристик. Получена оценка изменения испарения и стока после проведения гидролесомелиорации. Впервые расчетным путем получена антропогенная составляющая испарения и стока в производных лесах



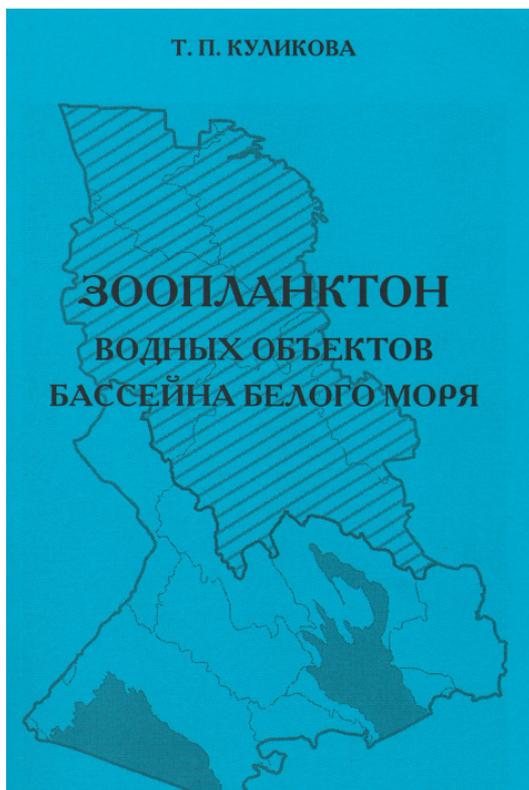
Карелии. Монография может быть полезна для специалистов гидрологов, лесоводов, экологов, преподавателей и студентов, обучающихся по специальностям гидрология суши, лесное хозяйство и экология.

Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Hydrological role of forest management and forest industry activities in the taiga zone of Russian European North. Petrozavodsk, 2010. 225 p.

The monograph is devoted to hydrology pressing questions – the formation of runoff in secondary and climax forests. The characteristic of forest management activities is presented. The substantiation of classification of forests from the point of view of their hydrological role is given. Techniques of calculation of forest inventory parameters necessary for the decision of hydrological problems are offered. Methodological aspects are considered and the techniques of estimation of change of elements of water budget as a result of forest industry and forest management activities (clean cutting, thinning, forest reclamation) are offered. Original techniques of calculation of transpiration, evaporations of a liquid and solid precipitation from forest canopy and evaporation from the ground cover are offered. Features of formation of water budget elements in secondary and climax forests are considered. Estimations of a hydrological role of clean cutting and thinning (including estimations for changing climatic conditions) are given. The change of evaporation and runoff after forest reclamation is estimated. The anthropogenic component of evaporation and of runoff in secondary forests of Karelia is calculated for the first time. The monograph can be useful for experts in hydrology, silviculture, ecology, for teachers and the students training in specialties of hydrology, forestry and ecology.

Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 325 с.

Монография представляет собой сводку по зоопланктону более 290 водоемов и водотоков бассейна Белого моря, является частью исследований по инвентаризации биологических ресурсов озер Карелии, а также включает данные по ряду водных объектов Мурманской и Архангельской областей. Она продолжает систематизацию имеющихся к настоящему времени сведений, начатую ранее по водным объектам бассейна Онежского озера (Куликова, 2004, 2007). В предлагаемом обзоре обобщены данные по фауне планктона 213 озер и 81 реки бассейна, приводится список видового состава сообще-



ства коловраток и ракообразных (380 таксонов) для 166 озер и 73 рек.

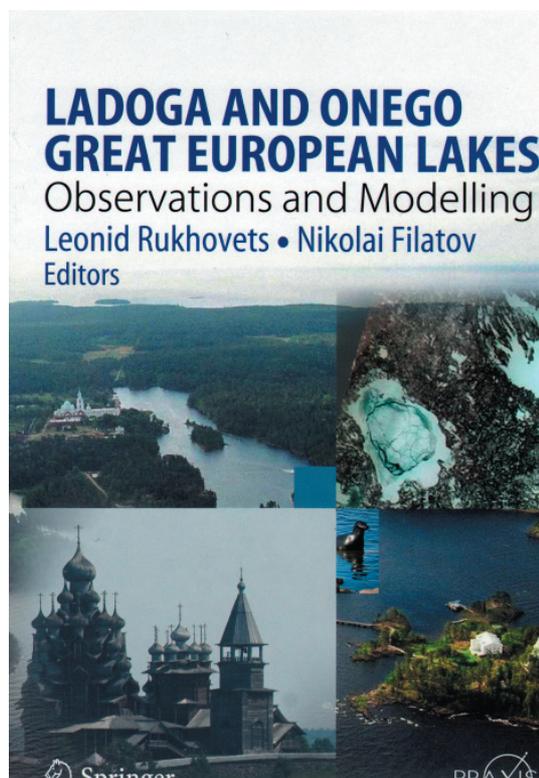
Книга представляет интерес для гидробиологов, зоологов, ихтиологов, экологов. Имеет практическое значение для службы мониторинга, рыбохозяйственных исследований.

Kulikova T. P. Zooplankton in waters of the White Sea drainage basin. Petrozavodsk, 2010. 325 p.

The book is an overview of zooplankton information from over 290 waterbodies and watercourses of the White Sea drainage basin. It is part of the work on the inventory of biological resources of lakes of Karelia, and also provides data on a number of waterbodies of the Murmansk and Arkhangelsk Regions. It continues systematization of available data, which began with Lake Onego catchment (Куликова, 2004, 2007). The overview summarizes data on the plankton fauna of 213 lakes and 81 rivers of the drainage basin, provides the checklist of species of the rotifer and crustacean community (380 taxa) for 166 lakes and 73 rivers. The book would be of interest for hydrobiologists, zoologists, ichthyologists, ecologists. It is of applied value for monitoring agencies and fish management studies.

Книга «Ладoga и Онего – Великие озера Европы: Наблюдения и моделирование» написана коллективом авторов из ИВПС КарНЦ РАН и Санкт-Петербургского экономико-ма-

тематического института РАН при участии сотрудников ИНОЗ РАН. В ней дана оценка современного состояния озер в условиях потепления климата и антропогенного воздействия. Особый интерес вызывают исследования озер после сильного антропогенного стресса в 1960–1980-х гг., когда за счет развития промышленности, сельского хозяйства на водосборе озер наблюдалось интенсивное их эвтрофирование и загрязнение, а при уменьшении антропогенной нагрузки при резком изменении экономической активности на водосборе и принятых мерах по охране окружающей среды в 1990-х гг. отмечается ослабление процесса эвтрофирования. Однако указывается, что процесс антропогенного эвтрофирования больших стратифицированных озер, запущенный ростом биогенной нагрузки, не поддается остановке в короткие сроки даже при значительных затратах на снижение нагрузки. Более того, процесс антропогенного эвтрофирования может продолжаться даже при снижении антропогенной нагрузки до уровня, имевшего место в олиготрофный период состояния озера. Работа основана на использовании трехмерных моделей гидротермодинамики и экосистем озер для обоснования методов сохранения качества вод озера. Расчеты выполнены при разных климатических условиях и биогенной нагрузке. Дано обоснование ассимиляционного потенциала и предельных нагрузок на озеро для сохранения качества вод.



Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modelling / L. Rukhovets, N. Filatov (Eds.). London: Springer-Praxis, 2010. 302 p.

The book addresses the contemporary state of the largest lakes of Europe and their watershed under anthropogenic and climate changes, with special emphasis placed on feedforward and feedback interactions between aquatic ecosystems, watershed hydrology and economy of the region. To investigate the responsiveness of both environments to the respective counter impacts, as well as regional and global climate change, data analysis of multi-year field observations, numerical modeling are exploited. This book is a first attempt to apply a *quantitative* approach to the assessment of changes occurring presently and anticipated in the future to dynamic relationships between the anthropogenic impacts, climate change and water ecosystems of both largest lakes of Europe. Thus, the book is primarily a synthesis of multifaceted interdisciplinary studies conducted by a team of experts working in a wide spectrum of natural and human sciences. Indeed, it is a synthesis of limnology, mathematics, hydrobiology, hydrochemistry, thermohydrodynamics, aquatic ecology, and economy.

Меншуткин В. В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб.: Карельский НЦ РАН, 2010. 419 с.

Книга посвящена методике создания и исследования имитационных моделей в области экологии, физиологии, эволюции, демографии и экономики природопользования. Все модели реализованы автором в виде компьютерных программ. Книга состоит из двух частей, посвященных теории и практике имитационного моделирования.

В первой части кратко излагаются основы методов моделирования, а также даны необходимые сведения о математическом аппарате, используемом при построении моделей. В книге описываются и применяются различные методы математического моделирования, широко используется язык моделирования STELLA, а также методы конечных и клеточных автоматов и нечеткой логики.

Во второй части книги описаны модели, созданные автором. Тематика этих моделей разнообразна. Модели разнообразных физиологических циклов, популяций рыб, водных беспозвоночных и человека вводят в проблематику детерминированных и стохастических моделей популяций. Сообщества представлены моделями ихтиоценозов, волков, оленей, кабанов



и фитоценозом букового леса. Модели экологических систем, помимо обобщенного теоретического подхода, описывают конкретные природные объекты. Также представлены экономико-экологические модели. Раздел, посвященный моделированию процесса эволюции, включает в себя микроэволюционные модели рыб и водных беспозвоночных, эволюции гаммарид Байкала и процесса выхода хордовых на сушу. В разделе дается сравнение различных теорий биологической эволюции с использованием компьютерных экспериментов. Книга завершается описанием моделей развития науки и динамики биосферы Земли после появления человека.

Монография предназначена для экологов, физиологов, эволюционистов и ученых других специальностей, а также студентов и аспирантов, которые используют или собираются использовать в своих исследованиях методы имитационного моделирования.

Menshutkin V. V. Art of Modelling (Ecology, Physiology, Evolution). Petrozavodsk; Sankt-Petersburg, 2010. 419 p.

The subject of the book is the technique for designing and studying simulation models in ecology, physiology, evolution, demography, environment, and economics. The book is composed of two parts dealing with the theory and practice of simulation modeling.

The first part briefly introduces the basics of modeling methods, and provides baseline data on the mathematical tools used to develop the models. The book offers descriptions and applications of various mathematical modeling techniques, makes wide use of the STELLA software, as well as finite-state and cellular automation, and fuzzy logic methods.

The second part of the book describes the models designed by the author. Their themes are quite diverse. These models of various physiological cycles, populations' of fish, aquatic invertebrates, and human being, introduce the reader to the problems of deterministic and stochastic population models. The models represent communities of fish, wolves, deers, wild boars, and the beech forest plant community. In addition to the general theoretical approach, models of ecological systems describe specific natural objects. A special section is devoted to modeling of terrestrial ecosystems. Environmental-economic models are represented.

Simulation of the evolutionary process includes micro-evolutionary models of fish and aquatic invertebrates, evolution of Baikalian gammarids, and the transition, of chordates to land. In this section, different theories of biological evolution are compared through computer experiments. In conclusion, models of scientific development and dynamics of the Earth's biosphere since the emergence of the human race are described.

The monograph is meant for experts in ecology, physiology, evolution and other fields, as well as for graduate and post-graduate students who use or plan to use simulation methods in their studies.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учетом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редакционные коллегии серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляют за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы «Анкет» и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия «Анкет» и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед сдачей в печать авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 780109.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН и другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступна на сайте <http://transactions.krc.karelia.ru>.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отрецензированы авторами.

Статьи должны быть подписаны всеми авторами.

Объем рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большого объема (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

Рукописи присылаются в электронном виде, а также в двух экземплярах, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку через 1,5 интервала (12 пунктов шрифта типа Times New Roman). Размер полей: сверху, снизу – 2,5 см, справа, слева – 2,5 см. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: УДК курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – место работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, то следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: ВВЕДЕНИЕ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ВЫВОДЫ. ЛИТЕРАТУРА); благодарности; литература (с новой страницы); таблицы (на отдельном листе); рисунки (на отдельном листе); подписи к рисункам (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилия, имя, отчество всех авторов полностью на русском и английском языках; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языках; должности авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и содержать не более 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, содержать только главную информацию статьи, не превышать объем – 15 строк.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ. Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга запятой, в конце фразы ставится точка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ должны содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

ИЗЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Для фаунистических и флористических работ следует указывать место хранения коллекционных образцов. Если в статье приводятся сведения о новых для исследованной территории таксонах, то желательно процитировать этикетку. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на наклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во Введении. Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более), и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Рыбаков, 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. На полях рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, должны быть пояснены в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG (не встраивать в Word). Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указанием желательного размера рисунка в книге, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и, желательно, с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

ЛИТЕРАТУРА. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.52008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32: 635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шеруди́ло¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексеичук², Е. Ф. Марковская¹

¹ Институт биологии Карельского научного центра РАН

² Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L., кратковременное снижение температуры, устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Key words: *Cucumis sativus* L., temperature drop, resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Частота встречаемости видов нематод в исследованных биотопах

Биотоп (площадка)	Кол-во видов	Встречаемость видов нематод в 5 повторностях				
		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %
1Н	26	8	4	1	5	8
2Н	13	2	1	1	0	9
3Н	34	13	6	3	6	6
4Н	28	10	5	2	2	9
5Н	37	4	10	4	7	12

Примечание. Здесь и в табл. 3–4: биотоп 1Н – территория, заливаемая в сильные приливы; 2Н – постоянно заливаемый луг; 3Н – редко заливаемый луг; 4Н – незаливаемая территория; 5Н – периодически заливаемый луг.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Илиел Э. Стереохимия соединений углерода / Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 210 с.

Несис К. Н. Океанические головоногие моллюски: распространение, жизненные формы, эволюция. М.: Наука, 1985. 285 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds.: P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.
Grove D. J., Loisides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, N 4. P. 507–516.

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

Ссылки на авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Ссылки на диссертации

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. С. 21–46.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28, 04.12.2000.
Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенчиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии : материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. биб-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

CONTENTS

From editor	3
N. N. Filatov. MODERN WATER PROBLEMS OF THE NORTH OF EUROPEAN RUSSIA	4
A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova, V. A. Karpechko, I. A. Litvinova, N. N. Filatov. WATER RESOURCES OF KARELIA: MAIN PROBLEMS OF SUSTAINABLE USE AND PROTECTION	12
P. A. Lozovik, A. V. Ryzhakov, A. V. Sabylina. PROCESSES OF MATTER TRANSFORMATION, CYCLES AND FORMATION IN NATURAL WATERS	21
N. M. Kalinkina, T. A. Chekryzheva, T. P. Kulikova, A. V. Ryabinkin. PATTERNS IN THE RESPONSE OF THE BIOTA OF KARELIAN LAKES TO CHANGES IN THE ION COMPOSITION UNDER THE IMPACT OF MINING MILL WASTEWATERS	29
N. A. Belkina. ROLE OF SEDIMENTS IN THE PROCESSES OF TRANSFORMATION OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN LAKE ECOSYSTEMS	35
T. M. Timakova, A. V. Sabylina, T. N. Polyakova, M. T. Syarki, E. V. Tekanova, T. A. Chekryzheva. MODERN STATE OF THE ONEGO LAKE ECOSYSTEM AND TRENDS OF ITS CHANGE DURING THE PAST DECADES	42
E. V. Tekanova, P. A. Lozovik, N. M. Kalinkina, T. P. Kulikova, T. N. Polyakova, A. V. Ryabinkin, Yu. L. Slastina, T. M. Timakova, T. A. Chekryzheva. RECENT STATE AND TRANSFORMATION OF THE NORTHERN PART OF VYGOZERSKOE RESERVOIR	50
R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, N. I. Pal'shin, A. J. Terzhevik. VARIATION OF THE TEMPERATURE AND OXYGEN REGIMES OF A SHALLOW LAKE IN WINTER	57
Z. S. Kaufman. SOME ASPECTS OF THE FAUNA FORMATION IN LAKES ONEGO AND LADOGA (review)	64
L. A. Rukhovets, N. N. Filatov. APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO THE TASKS OF PRESERVATION OF ONEGO LAKE WATER RESOURCES	77
V. V. Menshutkin. LOGICAL-LINGUISTIC MODELS OF THE FISH POPULATIONS AND LAKE ECOLOGICAL SYSTEMS	88
N. E. Kulakova, P. A. Lozovik. EXPERIMENTAL LEACHING OF ORE FROM THE KOSTOMUKSHA AND KORPANGA IRON ORE DEPOSITS	98
I. M. Nesterenko, S. L. Matveev. MOISTURE REDISTRIBUTION IN FREEZING SOILS IN KARELIA: ENGINEERING AND ECOLOGICAL PROBLEMS	103
G. S. Borodulina. ROLE OF GROUNDWATER FLOW TO LAKES OF THE ONEGA WATERSHED IN FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATER	108
O. Ya. Glibko, A. A. Lukin, B. F. Prishchepa. MODERN PROBLEMS OF FISHERY REGULATION BY LAWS AND STANDARDS	116
A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova. GUIDELINES ON THE USE OF GIS-TECHNOLOGY IN THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCE USE	124
L. E. Nazarova. ABOUT ASSESSMENT OF COMFORTABLE CLIMATE OF KARELIA	129
SHORT REPORTS	
I. Yu. Potapova. THE ROLE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN THE FORMATION OF THE CHEMICAL COPMOSITION OF SURFACE WATERS IN KARELIA	134
Yu. Slastina, S. Komulainen, M. Potakhin, M. Klochkova. CRYOPHYTON STRUCTURE IN LAKES OF THE PETROZAVODSK CITY	138
EXPEDITIONS	
A. V. Tolstikov, A. N. Sharov. Expedition of the research of Eastern Antarctica lakes	142
M. S. Bogdanova, I. U. Georgievskiy, S. P. Grippa, V. L. Dmitriev, N. V. Lobanova, P. V. Medvedev, M. S. Potakhin, S. B. Potakhin, A. V. Tolstikov, N. N. Filatov. The expedition of the Grant of Russian Geographical Society	143
DATES AND ANNIVERSARIES	
N. N. Filatov, M. T. Syarki. Zalman Kaufman (on the 90 th anniversary)	144
REVIEWS AND BIBLIOGRAPHY	147
INSTRUCTION FOR AUTHORS	152

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**

№ 4, 2011

ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*Печатается по решению
Президиума Карельского научного центра РАН*

Редактор Л. В. Кабанова
Оригинал-макет Т. Н. Люрина

Подписано в печать 19.09.2011. Формат 60x84¹/₈.
Гарнитура Pragmatica. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 14,8. Усл. печ. л. 18,1.
Тираж 500 экз. Изд. № 198. Заказ 985

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50