

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»



ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 4, 2021

Серия ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2021

Главный редактор
А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ»

Н. Л. БОЛОТОВА, д. б. н., проф.; А. В. ЗИМИН, д. г. н.; В. Н. ЗЫРЯНОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; С. Д. ГОЛОСОВ, к. ф.-м. н.; С. Ф. КОМУЛАЙНЕН, д. б. н.; А. В. КУРАЕВ, к. г. н.; Е. А. КУРАШОВ, д. б. н.; М. ЛЕППЯРАНТА, доктор; Л. Е. НАЗАРОВА (зам. ответственного редактора), к. г. н.; И. Ш. НОРМАТОВ, д. х. н., проф.; Л. А. ПЕСТРЯКОВА, д. г. н.; Т. И. РЕГЕРАНД (ответственный секретарь), к. б. н.; А. В. РЫЖАКОВ, к. х. н.; А. Ю. ТЕРЖЕВИК, к. т. н.; А. П. ФЕДОТОВ, д. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ (ответственный редактор), чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Г. Т. ФРУМИН, д. х. н.

Издается с января 2009 г.

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 4, 2021

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

Petrozavodsk
2021

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.); N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. V. RYZHAKOV, PhD (Chem.); A. Yu. TERZHEVIK, PhD (Tech.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.); V. N. ZYRYANOV, DSc (Phys.-Math.).

Published since January 2009

Monthly

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Tel. (8142)762018; fax (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

© Karelian Research Centre, Russian Academy of
Sciences (KarRC RAS), 2021

© Northern Water Problems Institute of KarRC RAS, 2021

От редактора

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию первый юбилейный выпуск серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды КарНЦ РАН». Второй выпуск выйдет в сентябре 2021 г. В юбилейные номера вошли статьи, поступившие в редакцию в рамках работы Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы и пути решения практических задач сохранения и рационального использования водных объектов Северо-Запада России», посвященной 30-летию Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ) и 75-летию Карельского научного центра РАН.

Выпуск открывается обзорной статьей, в которой представлены основные результаты исследований ИВПС КарНЦ РАН за 30 лет, выполненных в соответствии с основными направлениями деятельности института, а также работ по российским и международным грантам и прикладным проектам. Основными объектами, на которых проводились эти исследования и выполняются в настоящее время, являются Белое море, Ладожское и Онежское озера, озерно-речные системы и подземные воды Карелии. В обзоре приведены сведения о важных практических разработках института, выполненных по заданию федеральных и региональных органов, министерств, ведомств, предприятий и организаций, в частности, по федеральной целевой программе «Обеспечение населения России питьевой водой» (Постановление Правительства РФ от 06.03.1998 N 292), а также сведения о создании и внедрении информационных систем для использования их в соответствующих организациях. Рассматриваются вопросы разработки новых научно обоснованных методов рационального использования и охраны водных ресурсов, оценки ассимиляционного потенциала и устойчивости водных систем к внешним воздействиям. Показаны особенности климата севера европейской части России и оценивается его комфортность для проживания населения.

Статьи серии «Лимнология и океанология» в обоих юбилейных выпусках традиционно распределены по тематическим разделам. В разделе «Хроника» вы найдете информационное сообщение о юбилейной конференции ИВПС КарНЦ РАН, которая успешно проведена в непростое время пандемии в сотрудничестве с коллегами из более чем 30 организаций науки и высшего образования России.

Благодарим всех участников конференции и авторов статей юбилейных выпусков серии.

Н. Н. Филатов, чл.-корр. РАН, д. г. н.

УДК 061.62:556

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИВПС КарНЦ РАН (ОБЗОР)

**Н. Н. Филатов, Н. А. Белкина, Г. С. Бородулина, М. Б. Зобков,
Н. М. Калинкина, Л. Е. Назарова, А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд,
А. В. Рыжаков, Е. В. Теканова, А. В. Толстиков**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия*

Приводятся основные результаты исследований ИВПС КарНЦ РАН за последние 30 лет, выполненные в соответствии с основными направлениями деятельности института. Представлен ряд сведений об исследованиях по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации, работы по российским и международным грантам и прикладным исследованиям. Даны сведения о результатах изучения Белого моря, Ладожского и Онежского озер, озерно-речных систем, подземных вод. Приведена краткая информация о важных практических разработках, выполненных по заданию федеральных и региональных органов, министерств, ведомств, предприятий и организаций, по программе обеспечения питьевой водой населения, а также разработке и внедрению информационных систем для использования их в соответствующих организациях. Даны представления о результатах исследований, выполненных ИВПС совместно с институтами и университетами России и зарубежных стран, в частности, по изучению водных ресурсов, качества вод, экосистем Белого моря, крупнейших озер России, а также по исследованию подледного режима озер Севера РФ.

Ключевые слова: ИВПС КарНЦ РАН; Белое море; Ладожское озеро; Онежское озеро; озерно-речные системы; подземные воды.

N. N. Filatov, N. A. Belkina, G. S. Borodulina, M. B. Zobkov, N. M. Kalinkina, L. E. Nazarova, A. V. Litvinenko, T. I. Regerand, A. V. Ryzhakov, E. V. Tekanova, A. V. Tolstikov. MAJOR RESULTS OF BASIC AND APPLIED RESEARCH AT THE NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE KarRC RAS (A REVIEW)

The review reports the main results of the studies carried out by NWPI KarRC RAS in the institute's major research areas over the past 30 years. Information is provided on some studies in national priority R&D areas, and on the activities implemented under regional and international grant-funded projects and applied initiatives. Some results of research on the White Sea, Lakes Ladoga and Onego, lake-river systems, and groundwater are reported. A summary is given of important practical developments ordered by federal and regional ministries and departments, companies and organizations, and implemented under the public drinking water supply programme. The information systems designed and implemented for these developments to be used by relevant organization are introduced. An overview of the results of studies carried out by NWPI collaboratively

with Russian and foreign institutes and universities is given, namely regarding research on water resources, water quality, White Sea ecosystems, Russia's largest lakes, and under-ice conditions in North Russian lakes.

Keywords: NWPI KarRC RAS; White Sea; Lake Ladoga; Lake Onego; lake-river systems; groundwater.

Введение

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (далее ИВПС КарНЦ РАН) создан в соответствии с постановлением Президиума РАН № 142 от 14 мая 1991 г. на базе одного из старейших подразделений Карельского филиала АН СССР – Отдела водных проблем, образованного в 1946 г. на базе сектора гидрологии и водного хозяйства. История отдела и сектора подробно представлена как на сайте ИВПС КарНЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=1914>), так и в ряде публикаций. Свою научно-исследовательскую деятельность институт осуществлял в соответствии с Уставом и программами фундаментальных научных исследований государственных академий наук, утверждаемыми распоряжениями правительства РФ. Среди них: динамика и охрана подземных и поверхностных вод, ледники, проблемы водообеспечения; Мировой океан; эволюция окружающей среды и климата под воздействием природных и антропогенных факторов; научные основы рационального природопользования и другие.

Главная цель деятельности ИВПС КарНЦ РАН состояла в проведении фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области гидрологии и смежных естественных дисциплин и прикладных исследований, связанных с изучением, рациональным использованием и охраной водных ресурсов. Уставом были определены четыре главных научных направления, охватывающих широкий спектр актуальных проблем наук о Земле по разделам гидрология, география, гидробиология и охрана окружающей среды. Эти направления сформулированы следующим образом:

- оценка состояния водных ресурсов и водно-экологического потенциала территории и развитие научных основ управления водными ресурсами Европейского Севера России, включая их охрану, использование и восстановление;
- выявление фундаментальных закономерностей функционирования озерно-речных систем и их изменчивости под влиянием природных и антропогенных факторов;

- научное обоснование природоохранных и восстановительных мероприятий, совершенствование методов управления водными ресурсами и прогнозирования их изменений;
- анализ устойчивости водных объектов к антропогенным воздействиям (целлюлозно-бумажной, металлургической и горнодобывающей промышленности, лесных вырубок, сельскохозяйственной и лесной мелиорации, нефтяных и газовых промыслов) в условиях Европейского Севера России.

Представить все фундаментальные и прикладные результаты в одной статье невозможно, поскольку за 30 лет ИВПС КарНЦ РАН направил в ООФАиГ, ОНЗ РАН, а затем в ФАНО и Министерство науки и высшего образования РФ более 100 наиболее значимых результатов и опубликовал более 3 тыс. статей и 50 монографий, в которых приведены важные результаты исследований. В настоящей публикации дано представление о некоторых важных результатах, соответствующих основным направлениям научной деятельности, определенным Уставом ИВПС КарНЦ РАН. Многие результаты получены благодаря тесному сотрудничеству с другими научными организациями России – институтами КарНЦ РАН, ИНОЗ, ИВП, ИО, СПб ЭМИ, НИЦЭБ, ММБИ и ИППЭС КНЦ РАН, ААНИИ, МГУ им. Ломоносова, Международным центром дистанционных методов и окружающей среды им. Нансена, Центром «Аэрокосмос», Санкт-Петербургским госуниверситетом, ПетрГУ и научными учреждениями зарубежных стран (Финляндии, Швейцарии, Швеции, Норвегии, Германии, Канады, США, Индии и других).

Водные ресурсы и водно-экологический потенциал Европейского Севера России

Водные ресурсы Северного экономического района России

Изучены водные объекты, водные ресурсы, водохозяйственный комплекс Европейского Севера России, Северного экономического района России (СЭР), в состав которого входят шесть субъектов Федерации: Архангельская,

Вологодская, Мурманская области, Республики Карелия и Коми, Ненецкий автономный округ [Филатов и др., 2016б]. Исследования выполнены в рамках комплексных проектов изучения функционирования водных экосистем озер, озерно-речных систем и подземных вод: «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике», «Водные ресурсы Севера Европейской территории России – современное состояние и перспективы рационального использования с позиций национальной безопасности России (социальные, экологические, экономические и международные аспекты)», а также грантов РФФИ и РНФ.

В ИВПС с использованием средств ГИС созданы соответствующие базы данных (БД): «Водные ресурсы Европейского Севера России и их использование» (2017), «Гидрологические характеристики озер России» (2018), «Озера Карелии» (2011), «Водные объекты Республики Карелия» (2011), «Водохозяйственный комплекс Республики Карелия» (2011) и др. Правообладателем этих БД является Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. В них содержится информация о гидрографии и гидрологии, поверхностных и подземных водах, водном транспорте, гидроэнергетике, водопотреблении, водопользовании, рыбном хозяйстве, административном устройстве и населении региона и др. Базы данных предназначены для использования при реше-

нии научных проблем и актуальных практических задач развития водохозяйственного комплекса региона.

Обобщающие сведения о водных ресурсах региона, водохозяйственном комплексе приводятся в ряде статей [Филатов и др., 2016а, 2020б; Литвиненко и др., 2019] и монографий [Каталог..., 2001; Водные..., 2006; Озера..., 2013 и др.].

В результате исследований показано, что средние многолетние значения поверхностного стока на территории СЭР изменяются от 300 до 900 мм и более (рис. 1, а).

Ежегодно возобновляемые водные ресурсы СЭР за период наблюдений составляют около 520 км³. Доля подземных вод в общем водопотреблении представлена на рис. 1 (б). Все административные территории, входящие в СЭР, имеют высокую удельную водообеспеченность (ВО) как общими, так и местными водными ресурсами. В целом по СЭР удельная ВО местным стоком составляет 110 тыс. м³ в год на одного человека и 343 тыс. м³ в год на 1 км² территории. Это соответственно в 3,7 и 1,4 раза больше, чем в среднем по Российской Федерации. Таким образом, обеспеченность СЭР поверхностными водными ресурсами достаточно высока и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики региона. По степени обеспеченности ресурсами подземных вод питьевого качества рассма-

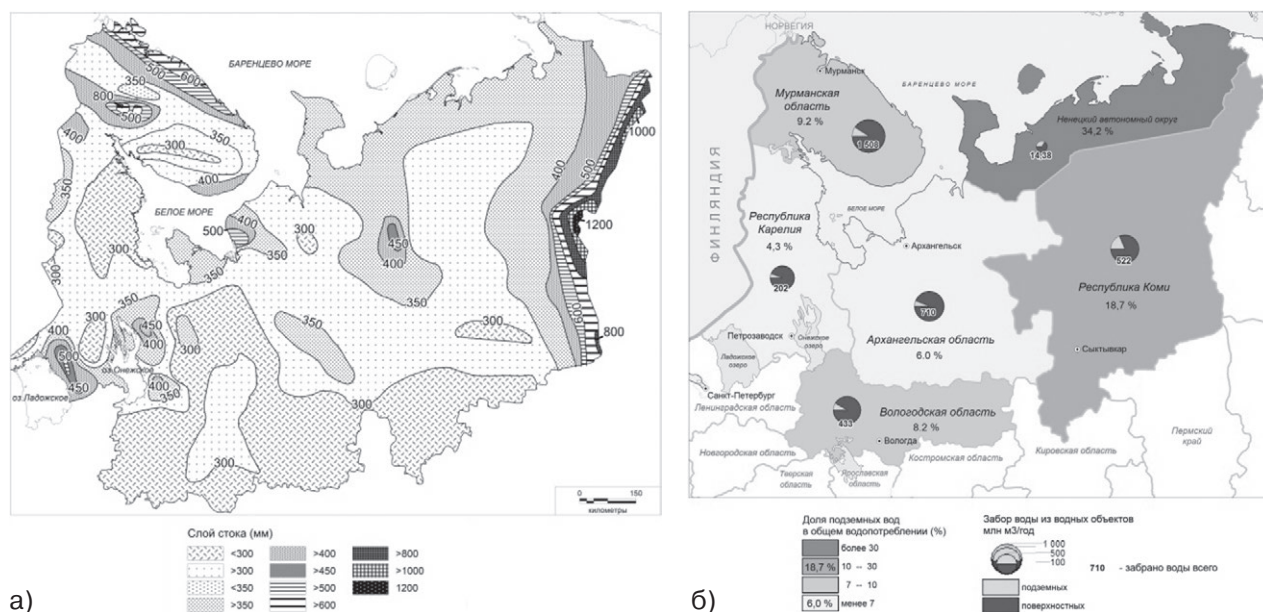


Рис. 1. Ежегодно возобновляемые водные ресурсы на территории Северного экономического района РФ [Филатов и др., 2016] (а); доля подземных вод в общем водопотреблении и забор воды из водных объектов (б)
Fig. 1. Annually renewable water resources in Russia's Northern Economic District [Filatov et al., 2016] (a); the share of groundwater in the total water consumption, and water withdrawals (б)

триваемые регионы относятся преимущественно к надежно обеспеченным. Наименьшими объемами подземных вод (запасы, добыча, использование) выделяется Карелия. В общем балансе современного водоснабжения Карелии подземные воды составляют всего около 5 % [Бородулина и др., 2017]. Необходимо учитывать, что питьевые кондиции подземных вод во многих случаях выше, чем поверхностных, и поэтому для региона является перспективным использование подземных вод, как это практикуется в соседней Финляндии, где подземные воды в питьевом водоснабжении составляют более 50 % [Водные..., 2006].

Проблемы хозяйственно-питьевого водоснабжения региона связаны с техническими или экономическими сложностями или, чаще всего, с вопросами несоответствия качества воды в источниках предъявляемым требованиям вследствие их природных особенностей и/или антропогенного влияния. Этот аспект для СЭР является фактором, затрудняющим экономическое развитие отдельных субъектов.

Полученные результаты представляют интерес для реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». На основе выполненных исследований даны предложения по реализации Программы по улучшению обеспечения населения Республики Карелия водой высокого качества, развитию гидроэнергетики и водного транспорта – чрезвычайно актуальных вопросов в связи с интенсификацией освоения ресурсов Арктической зоны.

Справочник «Озера Карелии»

Справочник «Озера Карелии» [2013] (рис. 2) создан по данным многолетних исследований ИВПС КарНЦ РАН и содержит систематизированную информацию по морфометрии, гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, донным отложениям, водному хозяйству 225 наиболее изученных озер Карелии. При создании справочника использовались ранее разработанные в ИВПС «Каталог озер и рек Карелии» [2001], база данных «Озера Карелии» (2011), «Информационно-справочная система «Озера и реки Карелии» (разработана совместно с ИПМИ КарНЦ РАН). В справочник вошли данные, полученные в основном ИВПС КарНЦ РАН, а также сведения, имеющиеся в других учреждениях: Институте биологии КарНЦ РАН, Институте леса КарНЦ РАН, ИНОЗ РАН, ЗИН РАН, а также в СевНИИРХ, ПетрГУ, ФГПУ «Карелрыбвод», Карельском республиканском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Комитете по водным ресурсам РК,

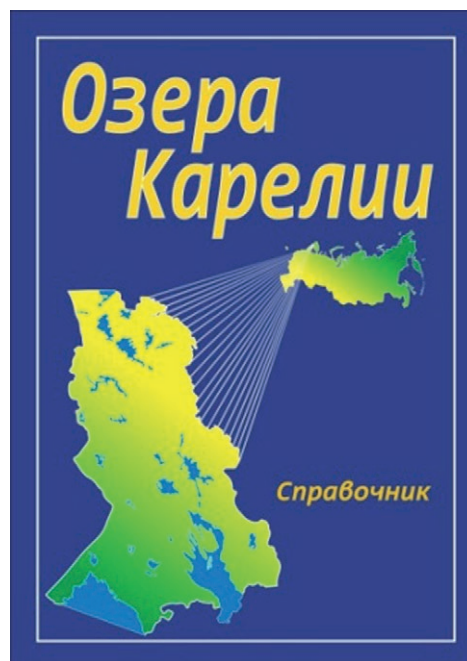


Рис. 2. Справочник «Озера Карелии»

Fig. 2. "Lakes of Karelia" reference book

Невско-Ладожском бассейновом управлении. Информация, приведенная в справочнике, может представлять интерес для научных исследований, при принятии управленческих решений для рационального использования, охраны и восстановления озер. Справочник издан при поддержке гранта РГО.

Экспертная система «Озера Карелии»

В Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН совместно с Санкт-Петербургским экономико-математическим институтом РАН разработана экспертная система для классификации озер, определения их трофического статуса, оценки водных и биологических ресурсов водоемов с помощью методов теории искусственного интеллекта. Система создана на основе базы данных 100 наиболее изученных озер региона (БД «Озера Карелии», 2011 г.). Для оценки связей, построения эффективных моделей озерных экосистем проведено всестороннее изучение озер, которые рассматриваются в совокупности как единое целое, состоящее из неповторимых индивидуальностей. На рис. 3 представлены результаты классификации озер Карелии и схема расположения изученных водоемов.

После оценки трофического статуса озер проведена их классификация с использованием метода многомерного шкалирования (рис. 3, а). Например, кластер А объединяет большие олиготрофные озера севера Карелии (Топозеро, Пяозеро, ставшие в 1980 годах Кум-

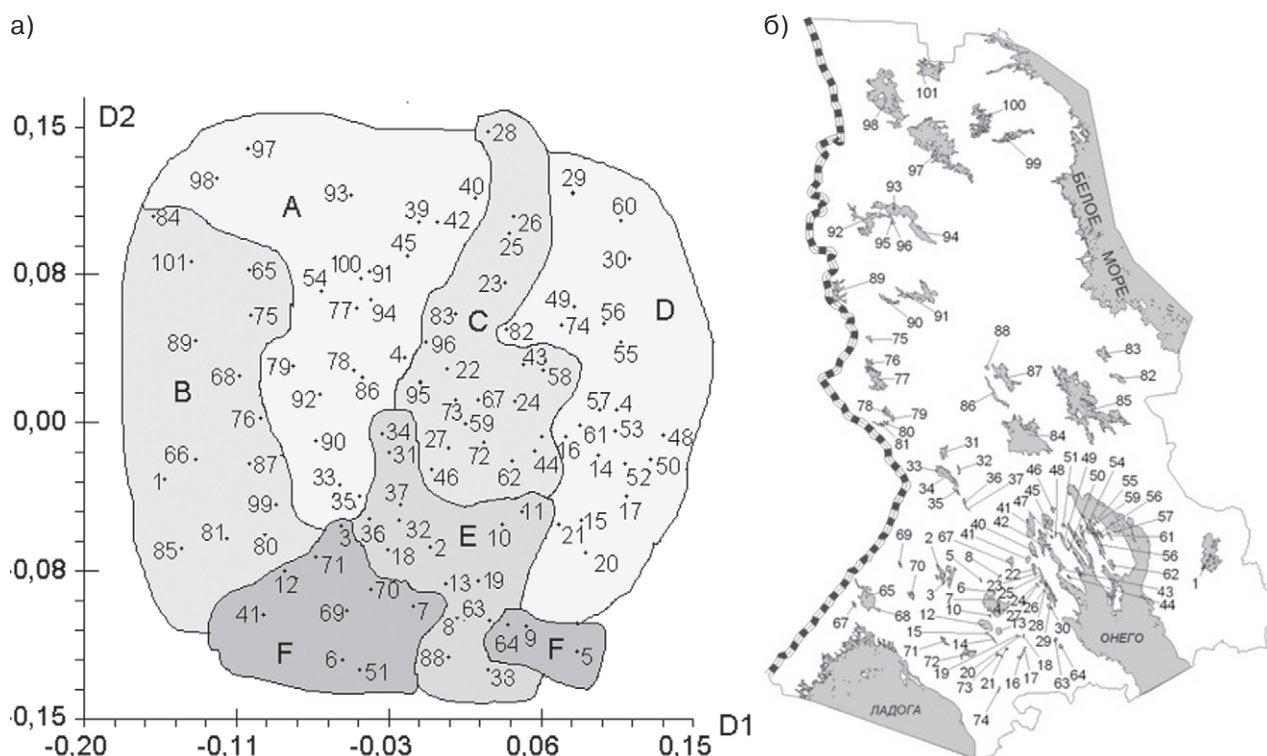


Рис. 3. Классификация 100 озер Карелии с использованием экспертной системы в координатах D1 и D2 по данным 10 порядковых характеристик и списков видов рыб, макрофитов и бентоса, а также типов грунтов и трофического статуса. Полученные классы озер: A, B, C, D, E, F (a) и расположение озер Карелии (б), сведения о которых использовались при разработке системы

Fig. 3. A classification of 100 Karelian lakes using an expert system in the D1 and D2 coordinates based on data for 10 ordinal characteristics and checklists of fish, macrophytes, and benthos species, as well as substrate types and trophic status data. The resultant lake classes: A, B, C, D, E, F (a) and locations of the lakes (b) that have provided data for the System development

ским водохранилищем). Разработанная система с применением «нечеткой» классификации позволяет дать более корректное отнесение к классу по сравнению с другими подходами [Меншуткин и др., 2009а, б; 2013].

Качество вод, состояние и изменения экосистем водных объектов Карельского гидрографического региона

Классификация качества вод водоемов и водотоков гумидной зоны по гидрохимическим параметрам

Геологические и климатические особенности Карелии обуславливают весьма широкую изменчивость основных параметров природных вод региона: pH – от 4,2 до 7,5, сумма ионов – от 5 до 200 мг/л, цветность – от 5 до 300 градусов. Гумусовые вещества имеют большое значение для формирования химического состава поверхностных вод Карелии. В целом наиболее характерными особенностями поверхностных вод региона являются их низкая минерализа-

ция, преобладание гидрокарбонатов и кальция в ионном составе, содержание значительных количеств органического вещества гумусовой природы. Во всех водах без исключения щелочноземельные металлы превалируют над щелочными, что является оптимальным для существования гидробионтов [Лозовик и др., 2011]. В связи с этим поверхностные водные объекты Карелии активно используются для рыбоводных хозяйств, на которых выращивается более 70 % российской форели. По результатам изучения химического состава вод озер, озерно-речных систем ИВПС КарНЦ РАН разработаны несколько классификаций и построены соответствующие картосхемы.

Классификация природных вод по совокупности данных химического состава воды и нормативов по ее использованию для питьевого водоснабжения и рыбохозяйственных целей

Составлена карта качества поверхностных вод Карелии (рис. 4). Выделено 5 классов

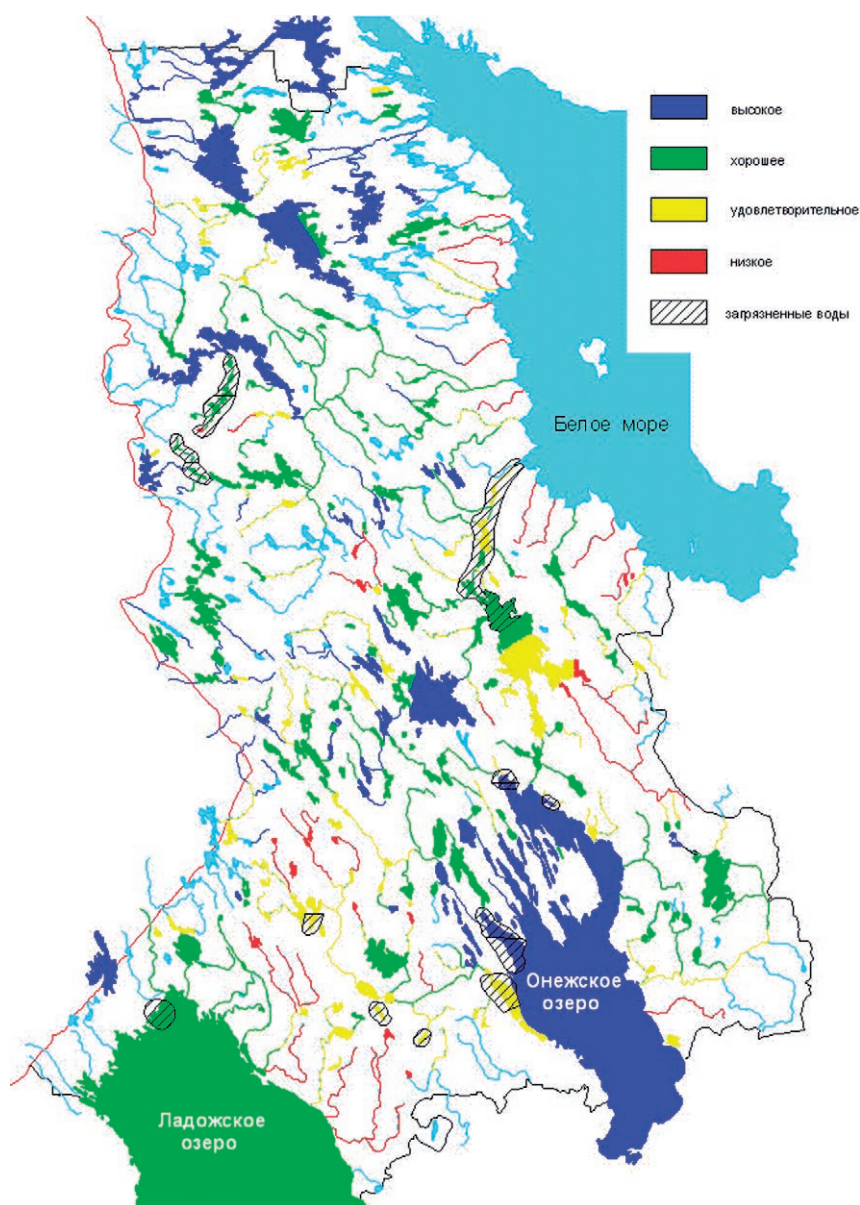


Рис. 4. Классификация природных вод по совокупности данных химического состава воды и нормативов по ее использованию для питьевого водоснабжения и рыбохозяйственных целей [Лозовик, 2013]

Fig. 4. A classification of natural waters based on the combination of data on the water chemical composition and regulatory standards for its use for drinking water supply, fishery and fish culture [Lozovik, 2013]

вод. Большинство озер имеют высокое или хорошее качество воды. К загрязненным относятся водные объекты (или их участки), подверженные воздействию точечных и/или рассеянных источников антропогенного воздействия. Качество вод отдельных заливов Онежского озера (Петрозаводской и Кондопожской губ) и северного шхерного района Ладожского озера вследствие антропогенного влияния отличается от более чистых вод центральной и южной частей этих водоемов.

Геохимическая классификация поверхностных вод на основе теории кислотно-основного равновесия

Поверхностные воды Карелии характеризуются низкой минерализацией и большим содержанием органических веществ, что проявляется в значительной их цветности и высокой доле анионов органических кислот в ионном балансе [Лозовик и др., 2011; Лозовик, 2013]. Это сказывается на продукционной способ-

ности водных объектов и проявляется в снижении слоя фотосинтеза, вследствие чего уровень трофии водного объекта зависит уже не только от концентрации общего фосфора, но и от цветности воды. Эти и другие специфические особенности высокогумусных вод наиболее полно учтены в геохимической классификации П. А. Лозовика [2013]. Взаимосвязь между содержанием минеральных и органических веществ в природных водах обуславливается их кислотно-основным равновесием, которое и было положено в основу классификации. Действие факторов органической и неорганической природы может быть установлено по изменению pH на одну и ту же величину и может служить критерием перехода от одного класса к другому. В результате установлена связь между щелочностью и pH, а также связь pH с гумусностью воды: увеличение pH на 0,6 единиц соответствует 2,5-кратному изменению гумусности воды. В переходных областях между классами вод используется показатель содержания железа общего, который тесно коррелирует с гумусностью. Для классификации по уровню трофии использовались показатели содержание $P_{\text{общ}}$ и гумусность. По щелочности, pH и гумусности было выделено 15 основных геохимических классов. Установлено, что среди водных объектов Карелии преобладают среднещелочностные воды различной гумусности (около 60 %). Высока доля слабокислых мезогумусных (12,5 %) и высокогумусных (13 %) вод. Количество объектов, отнесенных к шести

основным классам вод, в общей сложности составляет около 92 % от числа обследованных. Остальные классы представлены незначительным числом объектов (менее 20) [Зобков, 2012; Лозовик, 2013].

Разработка кинетической теории трансформации лабильных веществ ($P_{\text{общ}}$, $N_{\text{орг}}$, Fe, Si, органическое вещество) в природных водах гумидной зоны

На основе данной теории выведено уравнение связи между удерживающей способностью вещества в озере (R), константой скорости его трансформации (k) и периодом водообмена (τ): $R/(1-R) = k\tau$. Установлено, что трансформация лабильных веществ в озерных системах описывается кинетическим уравнением реакции 1-го порядка (рис. 5).

В среднем для разнотипных водных объектов Карелии константа скорости трансформации литофильных элементов (Fe, Si) составляет $0,32 \text{ год}^{-1}$, период полупревращения ($t_{1/2}$) – около 2 лет. Для аллохтонного органического вещества, фосфора общего и $N_{\text{орг}}$ $k = 0,13 \text{ год}^{-1}$, $t_{1/2}$ – около 5 лет. Полученные кинетические закономерности позволяют прогнозировать состав воды озер гумидной зоны при изменении внешней нагрузки на водоем, что имеет большое практическое значение для нормирования антропогенного воздействия на водоем с учетом его ассимиляционной способности [Лозовик, 2015; Рыжаков, 2017; Lozovik, Ryzhakov, 2017].

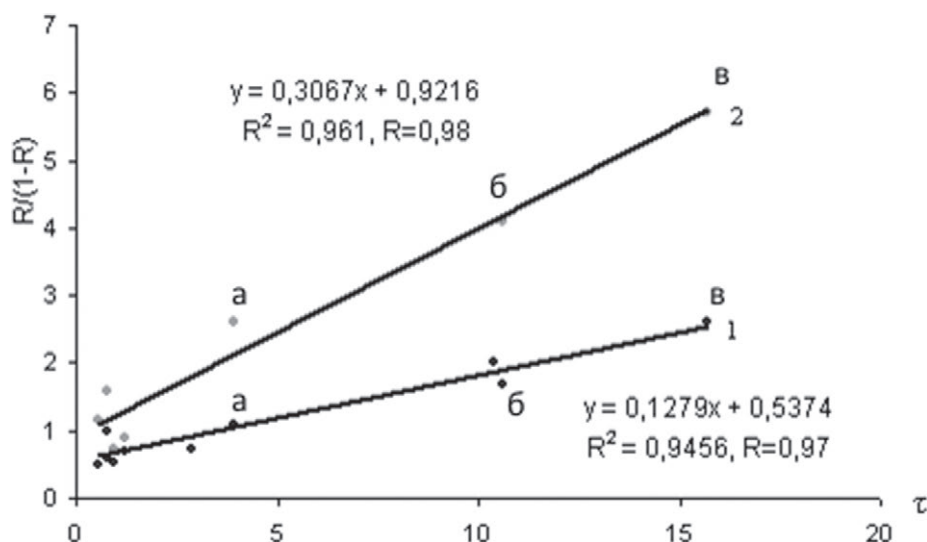


Рис. 5. Зависимость функции удерживающей способности $R/(1-R)$ от периода водообмена:

1 – для $P_{\text{общ}}$, 2 – для $Fe_{\text{общ}}$; а – Сямозеро, б – Ладожское оз., в – Онежское оз.

Fig. 5. Retention capacity function $R/(1-R)$ as a factor of the residence time:

1 – for P_{tot} , 2 – for Fe_{tot} ; а – L. Syamozero, б – L. Ladoga, в – L. Onega

Разработка модели месторождения минеральных железистых вод первого российского курорта «Марциальные воды»

Модель уникального месторождения минеральных железистых вод первого российского курорта «Марциальные воды» разработана на основе режимных наблюдений, изотопно-геохимических данных и палеореконструкций климата. Определено, что основными процессами формирования высокожелезистых вод являются окисление сульфидов в шунгитсодержащих комплексах палеопротерозоя и растворение продуктов окисления, имеющих криогенный генезис. Значительные отличия дебита, химического состава воды четырех близко расположенных скважин и существенный разброс возрастов их вод указывают на смешение современных и реликтовых вод. Установлено, что техногенная деятельность в области питания подземных вод явилась причиной значительных изменений в изотопном составе минеральных вод на фоне относительно стабильного химического состава. Результаты исследования позволяют рационально и экологически безопасно использовать месторождение минеральных вод и расширить лечебно-оздоровительные возможности региона [Бородулина и др., 2017, 2020].

Закономерности изменения гидрологического режима и водных экосистем озер под влиянием климата и антропогенных факторов

Внутривековая изменчивость и долгосрочные прогностические оценки уровня воды крупнейших озер Евразии

Одна из ключевых проблем великих озер Евразии – недостаточное понимание причин и закономерностей изменчивости многолетних внутривековых колебаний элементов гидрологического режима, уровня воды, что не позволяет корректно решать задачу его прогноза и ряд практических вопросов по управлению ресурсами озер. ИВПС КарНЦ РАН, ИВП РАН и ЛИН СО РАН выполнены совместные исследования закономерностей изменения уровня воды крупнейших озер Евразии и даны прогностические оценки многолетних изменений [Филатов и др., 2016а]. Все ранее предпринятые попытки долгосрочного прогноза внутривековых изменений уровня Каспия с использованием разнообразных методов оказались в основном неудачными. Причины долгопериодных внутривековых колебаний уровня Каспия не имеют до сих пор однозначного объяснения. На рис. 6 представлен график внутривековой

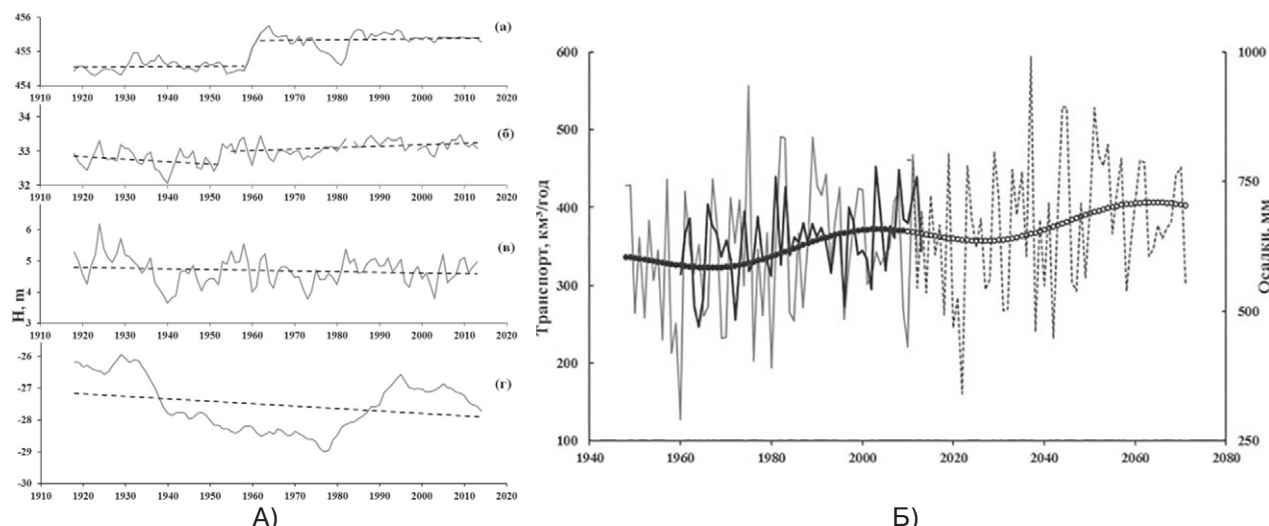


Рис. 6. Многолетние изменения среднегодовых значений уровня воды озер России: Байкал (а), Онежское (б), Ладожское (в), Каспий (г) [Филатов и др., 2016] (А). Оценки изменения горизонтального транспорта влаги ($\text{км}^3/\text{год}$) в бассейн реки Невы в XX столетии и прогностические оценки его тенденций в XXI столетии по данным моделирования [Выручалкина и др., 2016] (Б)

Fig. 6. Long-term changes in among-year averages of the water level in lakes of Russia: Baikal (a), Onego (б), Ladoga (в), the Caspian (г) [Филатов и др., 2016] (A). Estimates of change in horizontal moisture transport (km^3/year) to the Neva River catchment in the 20th century, and predictive estimates of its 21st century trends based on modeling data [Vyruchalkina et al., 2016] (B)

изменчивости уровня крупнейших озер России и расчетные значения транспорта влаги в бассейн реки Невы, на которых даны прогностические оценки его тенденций в XXI столетии по данным моделирования [Выручалкина и др., 2016].

Рисунок 6 (А) демонстрирует слабую коррелированность внутривековых колебаний уровня воды великих озер России. Согласно принятому комбинированному климатическому сценарию (разработан в ИВП совместно с ИВМ РАН), основанному на композиции трендовой и циклической составляющей изменений климата, увеличение уровня воды Ладожского и Онежского озера можно ожидать после 2060 г. (рис. 6, Б) [Выручалкина и др., 2016]. Анализ удаленных связей внутривековой изменчивости уровня крупнейших озер России и Великих озер Северной Америки не выявил общих глобальных закономерностей, которые позволили бы улучшить возможности долгосрочного прогноза внутривековых колебаний уровня. Для крупных озер России, как и Великих американских, отмечается большая неопределенность долгосрочного прогноза внутривековых изменений уровня вод [Филатов и др., 2020а].

*Закономерности изменений
гидрологического режима и экосистем
крупнейших озер европейской территории
России*

Для оценки влияния климата и антропогенных факторов на экосистемы крупнейших озер

Европы – Ладожского и Онежского – собраны и систематизированы данные об изменении климата на водосборе, гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, ихтиоценозах, донных отложениях, водохозяйственной обстановке, биогенной нагрузке и загрязнении озер, которые имелись в ИВПС КарНЦ РАН по Онежскому озеру. Также получены необходимые данные других организаций (Росгидромет, ГосНИОРХ и др.) [Онежское..., 2010] (рис. 7, а). Основные результаты экспериментальных исследований и моделирования экосистемы Ладожского озера получены ИНОЗ РАН и СПб ЭМИ РАН. Опыт экспериментальных исследований и моделирования экосистемы Онежского озера обобщен в работах [Руховец и др., 2006; Меншуткин и др., 2013; Руховец, Филатов, 2014].

Расчеты показали, что модель экосистемы Онежского озера [Руховец и др., 2006] адекватно воспроизводит круглогодичное функционирование экосистемы. На основе многолетних наблюдений и результатов моделирования сделан вывод о том, что по крайней мере пелагиаль Онежского озера в настоящее время сохраняет олиготрофный статус. Важным следствием проведенных экспериментов является то, что антропогенный пресс (до 2015 г.) является основным фактором, определяющим состояние экосистемы и качество воды в исследуемых озерах. Установлены критические нагрузки, при которых озеро не будет переходить в другой трофический статус. Оценены ассимиляционная емкость водоема и возможные последствия антропогенной деятельности на водосборе (гидроэнерге-

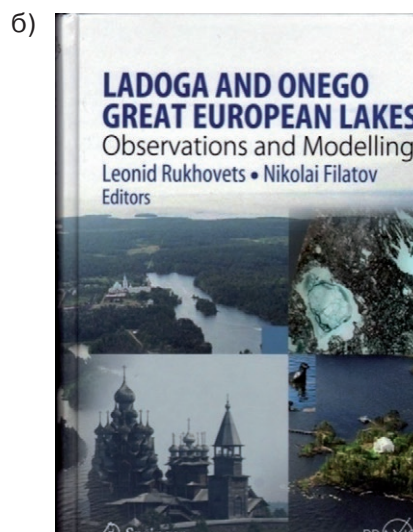
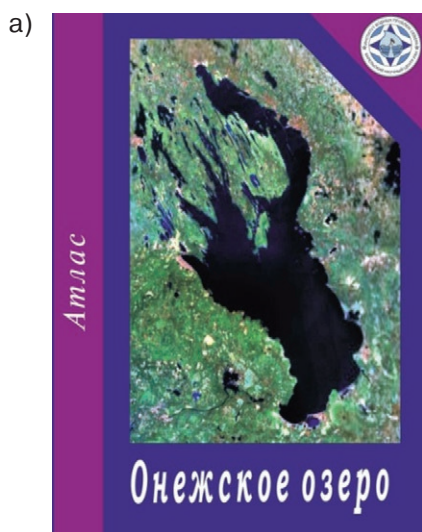


Рис. 7. Атлас «Онежское озеро» [2010] (а) и монография «Ladoga and Onego – Great European lakes. Observations and Modeling» [2010] (б)

Fig. 7. Atlas of "Lake Onego" [2010] (a) and the monograph "Ladoga and Onego – Great European lakes. Observations and Modeling" [2010] (b)

тика, ЦБП, сбросы сточных вод и в особенности нефтепродуктов). Сохранение высокого трофического статуса Онежского озера может быть обеспечено поддержанием поступления биогенных элементов на уровне, не превышающем 600–800 т Р/год и 15 000 т N/год, и строительством комплексов очистных сооружений в городах, расположенных на побережье озера [Руховец и др., 2006; Ladoga..., 2010] (рис. 7, б).

Происхождение биоты континентальных водоемов

Исследования происхождения, становления и развития жизни в пресных водах обобщены д. б. н. З. С. Кауфманом в монографии «Происхождение биоты континентальных водоемов» [2005]. Изложена история изучения происхождения фауны континентальных водоемов, дается характеристика условий ее обитания в морских и пресных водах и тех проблем, с которыми столкнулись организмы, адаптированные к существованию в морских условиях, при изменении условий обитания. Монография (рис. 8) представляет интерес для самого широкого круга читателей, интересующихся вопросами происхождения пресноводных организмов, а также для зоологов и эволюционистов.

Биоресурсы Онежского озера и озерно-речных систем его бассейна

В монографии ИВПС КарНЦ РАН (рис. 9) изложены научные принципы биомониторинга и методы сохранения биоресурсов Онежского озера и его бассейна на основе исследования современного состояния и функционирования сообществ и популяций гидробионтов. Выявлены последствия влияния антропогенных факторов на состояние популяций рыб. Исследованы особенности биопродукционного процесса и рассчитаны теоретически возможные величины рыбных запасов и уловов в Онежском озере, позволяющие рекомендовать более рациональные пути использования сырьевых ресурсов водоема. Проведена ревизия правовой и нормативной базы для оценки ущерба водным экосистемам на региональном уровне. Разработаны научно-организационные мероприятия, направленные на сохранение популяций рыб и предусматривающие компенсацию нанесенного ущерба от рыбохозяйственной деятельности.

Созданы базы данных о современном состоянии гидробионтов прибрежных районов озера. Проведена оценка пространственного распространения рачка-вселенца *Gmelinoides*

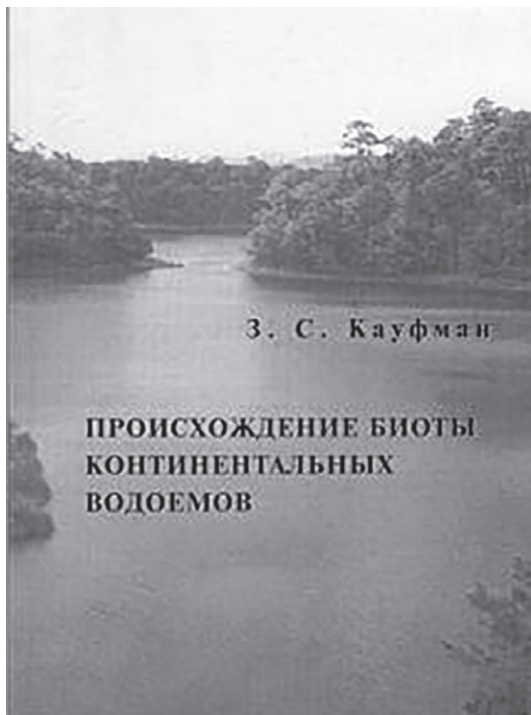


Рис. 8. Монография З. С. Кауфмана «Происхождение биоты континентальных водоемов» [2005]

Fig. 8. Monograph by Z. S. Kaufman "Genesis of the Biota in Continental Waters" [2005]

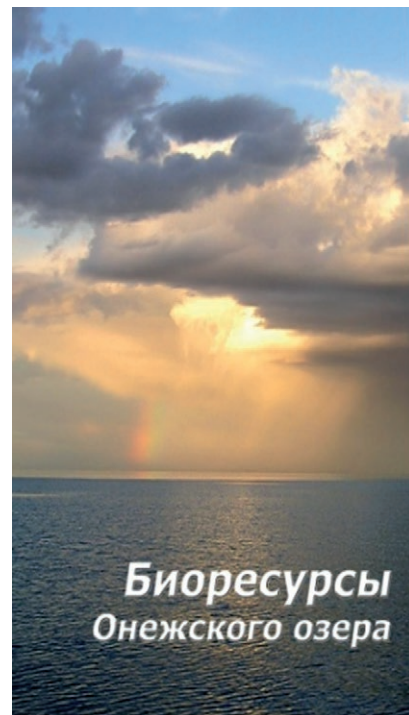


Рис. 9. Коллективная монография «Биоресурсы Онежского озера» [2008]

Fig. 9. Collectively authored monograph "Biological Resources of Lake Onego" [2008]

fasciatus Stebbing и количественных характеристик его популяций. Полученные данные необходимы для оценки степени нарушенности ценозов экосистемы при «биологическом» загрязнении, для прогноза состояния сообществ гидробионтов как кормовой базы рыб [Теканова и др., 2018; Калинкина и др., 2019].

Усиление влияния потепления климата на биогеохимические процессы в экосистеме Онежского озера. Браунификация вод

В условиях потепления климата произошло возрастание годового стока веществ со стоком р. Шуи в Петрозаводскую губу Онежского озера (рис. 10), и последовали изменения в химическом составе озерной воды в весенний период. В Петрозаводской губе выявлены достоверные изменения химических показателей – индикаторов влияния речных вод (увеличение цветности воды, содержания железа, фосфора, углекислого газа, снижение величины pH) за период с 1992 по 2019 год. Эти изменения привели к ухудшению качества воды в Петрозаводской губе Онежского озера – источнике питьевого водоснабжения г. Петрозаводска.

Накопление железа на дне в результате изменения геохимических процессов в системе «водосборная территория – водоем» вызвало резкое сокращение количества в Петрозаводской губе глубоководного макрозообентоса, в том числе реликтового донного рачка *Monoporeia affinis* – основного трофического ре-

сурса бентосоядных рыб в глубоководной зоне. Начальные признаки браунификации в виде увеличения цветности воды, содержания железа и углекислого газа отмечены и в центральной части Онежского озера в верхнем перемешанном слое воды [Калинкина и др., 2018; Калинкина, Белкина, 2018; Kalinkina et al., 2020].

Впервые оценено изменение внутренней фосфорной нагрузки, формирующейся в условиях неравномерного антропогенного воздействия в Онежском озере

Установлено, что процесс трансформации органического вещества в донных отложениях Онежского озера (гумусо-железо-кремниевый тип) в окислительной обстановке на ранней стадии диагенеза, приводящий к образованию аутигенных минералов железа и марганца, является ведущим геохимическим процессом, обеспечивающим устойчивость экосистемы Онежского озера к внешним воздействиям естественной и антропогенной природы за счет изъятия фосфора из внутриводоемного цикла в результате его удержания и захоронения в донных отложениях [Белкина, 2015] (рис. 11).

Исследование выполнено по гранту РНФ 18-17-00176 «Палеолимнология Онежского озера: строение, процессы накопления и трансформации донных отложений. От приледникового озера до современных условий» (рук. д. г. н. Д. А. Субетто) и госзаданию «Пространственно-временная трансформация озерного седиментогенеза гумидной зоны. Позднее-

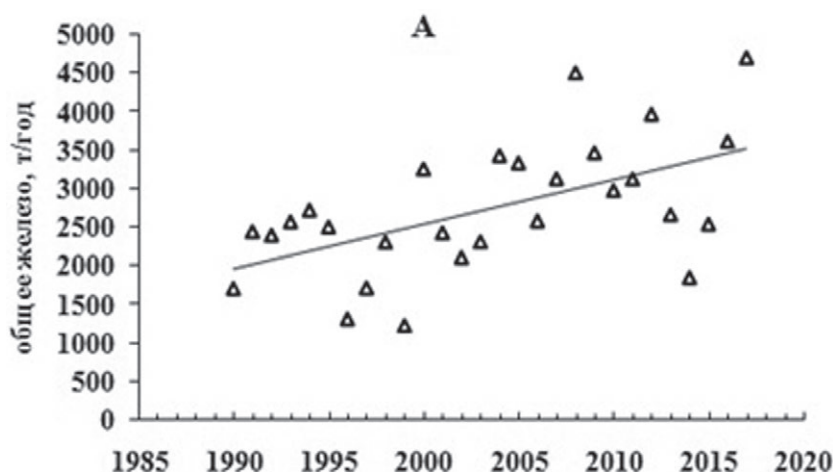


Рис. 10. Многолетний тренд изменения годового стока железа с водами р. Шуи в Петрозаводской губе в 1992–2019 годах (сплошная линия – линейный тренд за 30-летний период)

Fig. 10. Long-term trend in annual iron input from the Shuja River to Petrozavodsk Bay in 1992–2019 (solid line – 30-year-long linear trend)

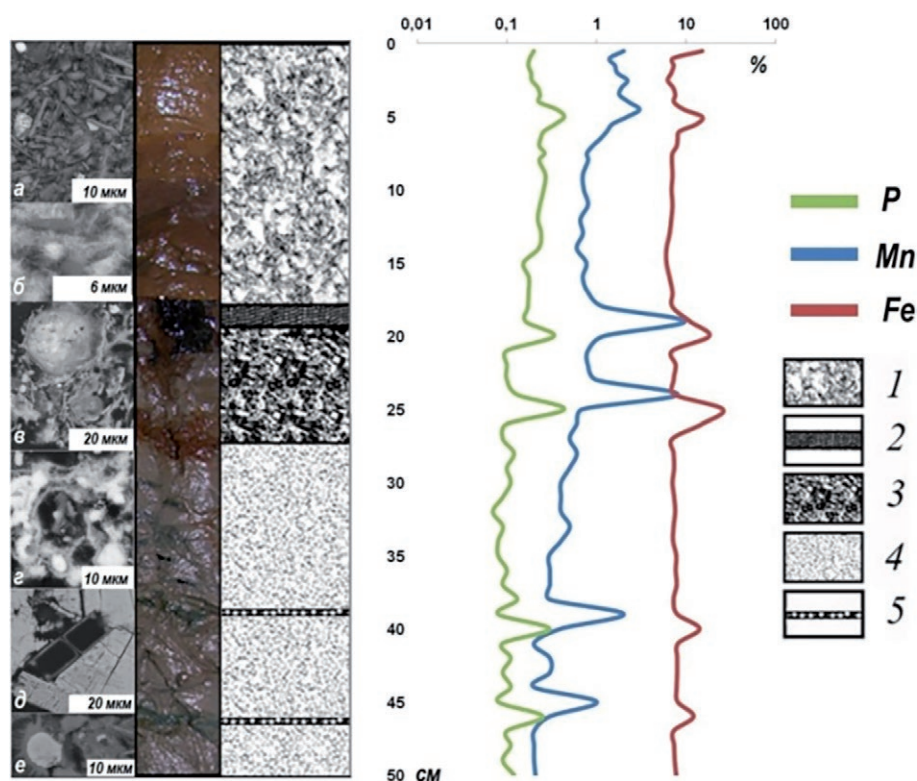


Рис. 11. Фосфор, железо и марганец в донных отложениях Онежского озера:

1 – ил охристого цвета (а – биогенный Si и обломочные минералы: мусковит, кварц и полевые шпаты; б – Fe-хлорит и иллит); 2 – рудная корочка черного цвета (в – марганцевые минеральные фазы), 3 – рудная корочка шоколадного цвета (минеральные фазы железа); 4 – неслоистый ил серо-зеленого цвета; 5 – микрослойки зеленого, белого и черного цвета (г – родохрозит, сидерит, д – вивианит, е – пиролюзит)

Fig. 11. Phosphorus, iron, and manganese in Lake Onego sediments:

1 – yellow silt (a – biogenic Si and clastic minerals: muscovite, quartz, and feldspars; б – Fe-chlorite and illite); 2 – black ore crust (в – manganese mineral phases), 3 – chocolate-brown ore crust (iron mineral phases); 4 – gray-green unstratified silt; 5 – green, white, and black microlamellae (г – rhodochrosite, siderite, д – vivianite, е – pyrolusite)

и послеледниковое время» [Strakhovenko et al., 2012; Белкина, 2019].

Реакция экосистем озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на глобальные и региональные изменения климата

Исследованы региональные изменения климата и их воздействие на озера разного размера, генезиса и формы, расположенные в разных физико-географических условиях. Для исследований были выбраны озера, находящиеся под достаточно сильным антропогенным воздействием, например, озера Восточной Фенноскандии, а также озера Восточной Антарктиды, мало затронутые антропогенным влиянием (рис. 12).

Изучена ответная реакция гидрологического режима, биоты озер на изменения климата [Филатов и др., 2012]. Для выявления общих глобальных и региональных особенно-

стей климата и других изменений и их влияния на экосистемы озер Восточной Фенноскандии проанализированы наблюдения Росгидромета продолжительностью около 100 лет, применены трехмерные математические модели, а также гидрофизические и химико-биологические характеристики 27 озер трех оазисов Восточной Антарктиды, собранные в 2010–2011 гг. во время проведения 56-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ). Как в Восточной Фенноскандии, так и в Восточной Антарктиде последние несколько десятилетий отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха. На всех озерах Восточной Фенноскандии отмечается увеличение безледоставного периода (БЛП). Наблюдаемые тенденции изменения климата в Восточной Антарктиде за последние 40–50 лет неоднородны. В оазисах Холмы Тала и Холмы Ларсеманн заметного влияния климата на изменения экосистем озер не выявлено, в отли-

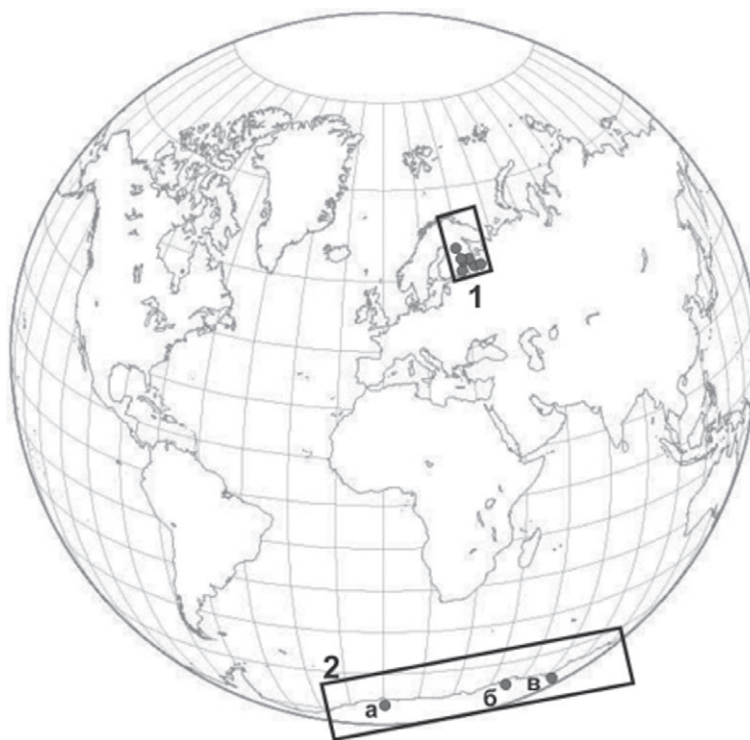


Рис. 12. Схема районов исследования озер:

1 – Восточная Фенноскандия, 2 – Восточная Антарктида (а – оазис Ширмахера; б – оазис Холмы Тала; в – оазис Холмы Ларсеманн)

Fig. 12. Lake research locations:

1 – Eastern Fennoscandia, 2 – East Antarctica (a – Schirmacher oasis; б – Thala Hills oasis; в – Larsemann Hills oasis)

чие от оазиса Ширмахера, из-за геологических особенностей региона. Гидрологические условия (прозрачность льда, постоянный ледяной покров) озер Восточной Антарктиды обеспечивали условия для развития цианобактериальных матов и мха на дне озер, но при потеплении климата в регионе, когда озера стали освобождаться от льда, устанавливается вертикальная изотермия с температурой воды примерно на 3 °C ниже по сравнению с озерами, покрытыми льдом. Исследования показали, что 3-метровый слой льда пропускает достаточное количество света даже до глубины 30 м. Свет не лимитирует развитие водорослей и цианобактерий [Шаров, Толстиков, 2020]. Однако низкое содержание биогенных веществ в воде ограничивает рост фитопланктона, обуславливая малые значения биомассы (менее 0,01 мг/л) и концентрации хлорофилла *a* (0,1–0,45 мкг/л). Таким образом, при потеплении климата в изученных озерах Антарктиды отмечается не увеличение, а снижение биологической активности организмов. В этом в настоящее время состоит отличие озер Восточной Антарктиды [Филатов и др., 2012; Шаров, Толстиков, 2020].

Диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях

Актуальность диагноза состояния и прогностических оценок экосистем великих озер России (Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское) обусловлена необходимостью рационального использования богатых ресурсов (водных, биологических, гидроэнергетических, транспортных, рекреационных) и охраной их экосистем. Для этого требуется создание эффективной системы поддержки принятия управленческих решений, построенной на необходимых данных, современных математических моделях и совершенной законодательной базе. В связи с этим в рамках гранта РНФ были поставлены задачи совершенствования методов диагноза (оценки состояния и изменчивости) и долгосрочного прогноза (возможных изменений) гидрологических характеристик и экосистем крупнейших озер России при антропогенных и климатических воздействиях с использованием разнообразных математических моделей и анализа данных наблюдений [Диагноз..., 2020]. Исследования выполнены консорциу-

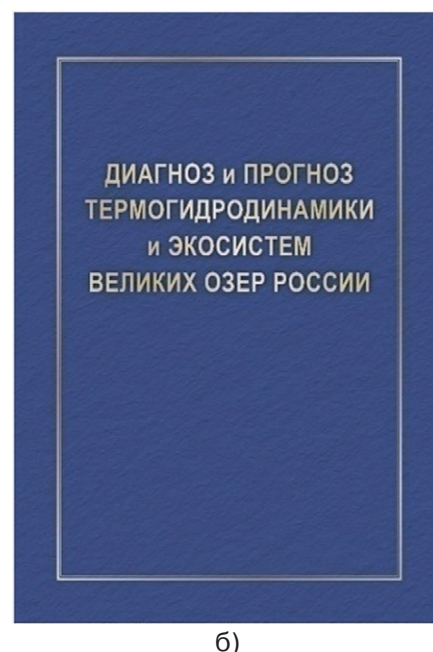
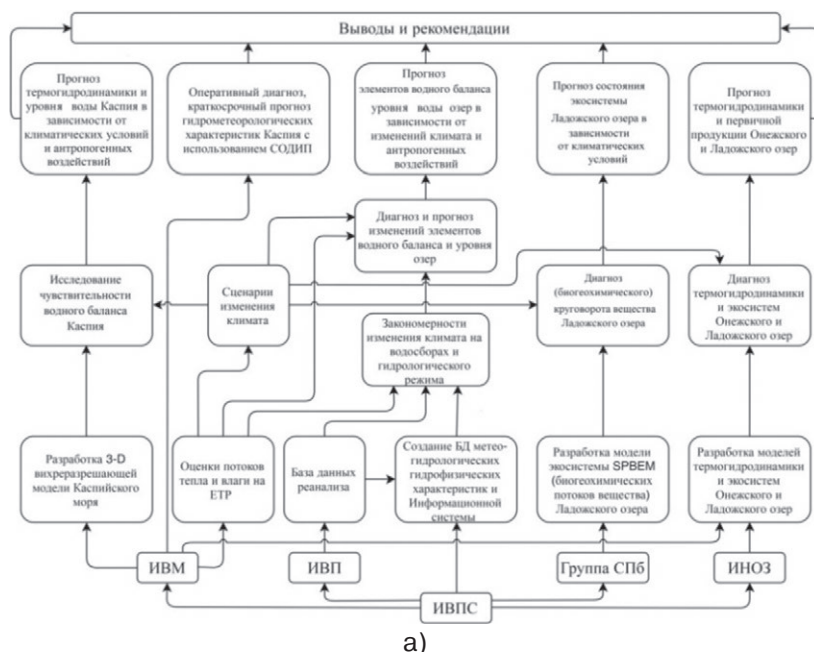


Рис. 13. Схема организации совместных исследований ИВПС КарНЦ РАН, ИВП РАН, ИВМ РАН, ИНОЗ РАН, СПб ИО РАН и результаты исследований для диагноза и прогноза состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях (а). Коллективная монография по результатам проекта (б)

Fig. 13. Layout of joint research implemented by Northern Water Problems Institute KarRC RAS, Water Problems Institute RAS, Institute of Numerical Mathematics RAS, Institute of Limnology RAS, Shirshov Institute of Oceanology RAS, and the research results of relevance for the diagnosis and prediction of ecosystem status under climatic and human impacts (a). Collectively authored monograph on the project results (b)

мом специалистов нескольких институтов Российской академии наук: ИВПС КарНЦ, ИВП, ИВМ, ИНОЗ, СПбФ ИО в рамках гранта РФ 14-17-00740-П (рис. 13).

В качестве информационной основы для разработки моделей использованы данные ИВПС КарНЦ РАН и ИНОЗ РАН. С использованием адаптированной для Ладожского и Онежского озер модели термодинамики, ранее разработанной для Каспия в ИВМ РАН, создана модель для имитации сезонных и многолетних изменений первичной продукции озер при потеплении климата [Голосов и др., 2020].

Другое важное направление исследований – создание 3D-моделей, которые позволяют описать механизмы изменений в экосистемах в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенных элементов в донных отложениях, которые служат «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем их реминерализации. На примере экосистемы Ладожского озера разработана версия такой 3D-модели [Исаев, Савчук, 2020]. Использовался опыт разработки подобной модели для Балтийского моря при создании системы при-

нятия управленческих решений NEST для Балтийского моря [Savchuk, 2018]. Разработанные модели и/или их блоки могут быть использованы для других крупных озер России (Каспия и оз. Байкал). По результатам исследований даны рекомендации Законодательному собранию РК, Федеральному Собранию РФ, Государственной Думе РФ и ОНЗ РАН (для Совета безопасности РФ) по разработке приоритетного проекта по рациональному использованию ресурсов и охране экосистем Ладожского и Онежского озер [Диагноз..., 2020].

Анализ устойчивости водных объектов к антропогенным воздействиям (целлюлозно-бумажной, металлургической и горнодобывающей промышленности, лесных вырубок, сельскохозяйственной и лесной мелиорации) в условиях Европейского Севера России

Разработка метода расчета изменений стока при рубках леса на территории Карелии

Выполнен цикл работ, посвященных актуальным вопросам гидрологии – формированию речного стока в производных и коренных лесах.

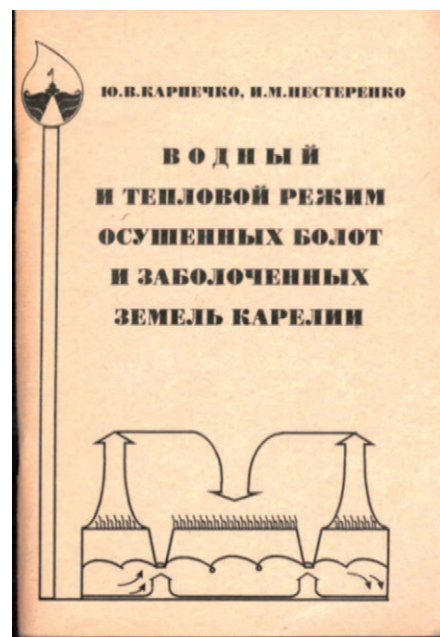
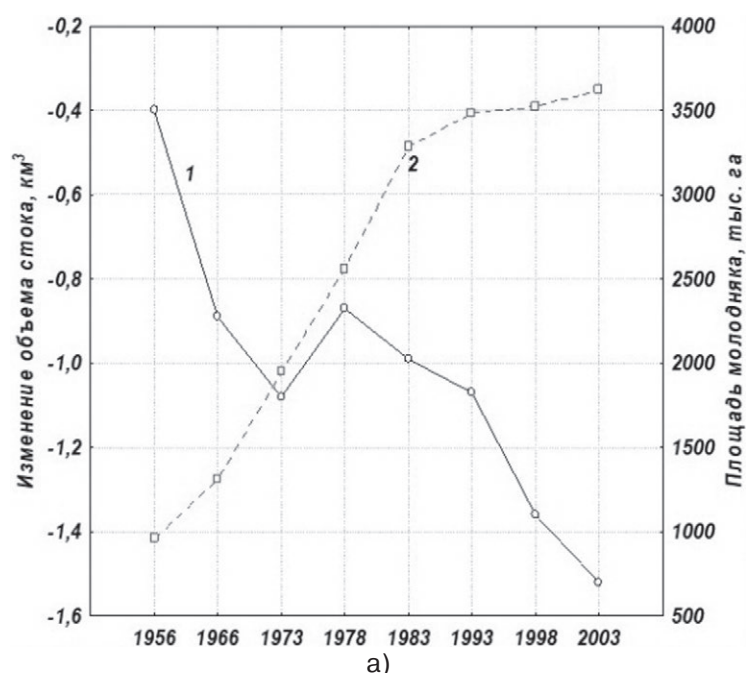


Рис. 14. Динамика антропогенной составляющей стока (1) и площади молодых лесов (2). При сохранении нынешнего объема заготовок древесины будет отмечаться снижение стока с лесопокрытой части территории Карелии на 1,5 км³/год [Карпечко, Бондарик, 2010] (а). Исследования в бассейнах рек Олонка, Шуя, имеющих заболоченность до 15 %, показали, что осушение не оказало существенного влияния на речной сток [Карпечко, Нестеренко, 1996] (б)

Fig. 14. Changes in the anthropogenic contribution to runoff (1) and the area of young forest (2). If timber logging is maintained at the current level, runoff from forested territory of Karelia will decline by 1.5 km³/year [Karpechko, Bondarik, 2010] (a). Water and temperature regime in drained mires and swampy forests in Karelia [Karpechko, Nesterenko, 1996] (b)

Приведена характеристика хозяйственной деятельности в лесу. Дано обоснование классификации лесов с точки зрения их гидрологической роли. Впервые расчетным путем получена антропогенная составляющая испарения и стока в производных лесах Карелии. Получены характеристики стока на водосборах и установлены их закономерности, которые необходимы для прогнозирования изменений при преобразовании природных условий, для построения математических моделей стока [Карпечко, Нестеренко, 1996; Карпечко, Бондарик, 2010].

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России при климатических и антропогенных воздействиях

В Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН выполнены многолетние комплексные исследования экосистем Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища) и Выгозера (Выгозерско-Ондского водохранилища). Результаты этой работы обобщены в коллективной монографии [Крупнейшие..., 2015]. В ней

определены особенности преобразования экосистем этих крупнейших озер-водохранилищ севера ЕТР. Для Верхне-Свирского водохранилища процесс восстановления экосистем связан с уменьшением поступления загрязнений и биогенов, возрастанiem после 1992 г. роли бактериопланктона, водных грибов в деградации органического вещества. Значительное воздействие на изменения экосистем водоемов оказывает развитие аквакультуры, садкового рыбоводства. Показаны особенности водохозяйственного использования водных ресурсов при разных моделях состояния экономики, например, наиболее водоемкой отрасли промышленности – целлюлозно-бумажной, доля которой в промышленном водопотреблении бассейна составляет 91 %. Снижение уровня лесозаготовок и ряд других причин начиная с 1989 г. повлекли за собой сокращение производства и снижение объемов водопотребления. Установлено, что современная фосфорная нагрузка на экосистемы близка к допустимой. Оценены допустимая биогенная нагрузка и ассимиляционный потенциал озера. Показано, что при сохранении биогенной

нагрузки на Верхне-Свирское водохранилище до 800 т Р/год и 1500 т N/год пелагиаль озера должна сохранять свой олиготрофный статус. Это позволяет принять данные величины в качестве оценок ассимиляционного потенциала по сбросу фосфора и азота в озеро.

Для Выгозерско-Ондского водохранилища установлено, что в последние 20 лет наблюдается восстановление его экосистемы и снижение трофического статуса. Показано, что процессы формирования донных отложений находятся под сильным влиянием антропогенного фактора, прежде всего поступления сточных вод Сегежского ЦБК. Требуется сократить до научно обоснованных сбросы загрязненных и недостаточно очищенных вод в эти водные объекты.

Результаты комплексных специализированных исследований

Комплексные исследования малых озер

В ИВПС КарНЦ РАН создана уникальная коллекция данных о гидрофизических процессах в малых мелководных озерах, полученная по результатам многолетних исследований и позволяющая проводить сравнительный анализ межгодовой изменчивости температуры воды и содержания растворенного кислорода на различных масштабах времени (от нескольких минут до месяцев). Проведены комплексные многолетние исследования термического, динамического, кислородного, радиационного

режимов, оптических свойств снежно-ледяного покрова, распределения фитопланктона в водной толще малых озер. Основные эксперименты выполнены на примере Вендюрского озера. Разработана методика длительных автономных измерений вертикального профиля температуры в придонных слоях воды и грунта и запатентована конструкция измерительной придонной платформы (патент на полезную модель № 153787).

Получен новый метод параметризации альбедо поверхности водоема умеренной зоны в период весеннего таяния, основанный на использовании в качестве предиктора аккумулированного внешнего потока тепла, определяющего скорость таяния слоев снежно-ледяного покрова (снега, белого и кристаллического льда) и, следовательно, изменчивость альбедо во времени [Тержевик и др., 2017; Здоровеннова и др., 2018].

Озерная модель FLake

Модель разработана совместно с партнерами по международным проектам INTAS-01-2132 (2002–2004), INTAS-Innovation-05-1000007-431 в 2006–2008 гг. [Mironov et al., 2010; Golosov et al., 2012]. Внедрена в систему численного прогноза погоды (ЧПП) Германии, находится на стадии внедрения в ЧПП Швеции, Великобритании, Франции, т. е. во все центры ЧПП высокого разрешения в Европе. Кроме того, она внедрена в региональные климатические модели RCA и CLM, рассматривается в качест-

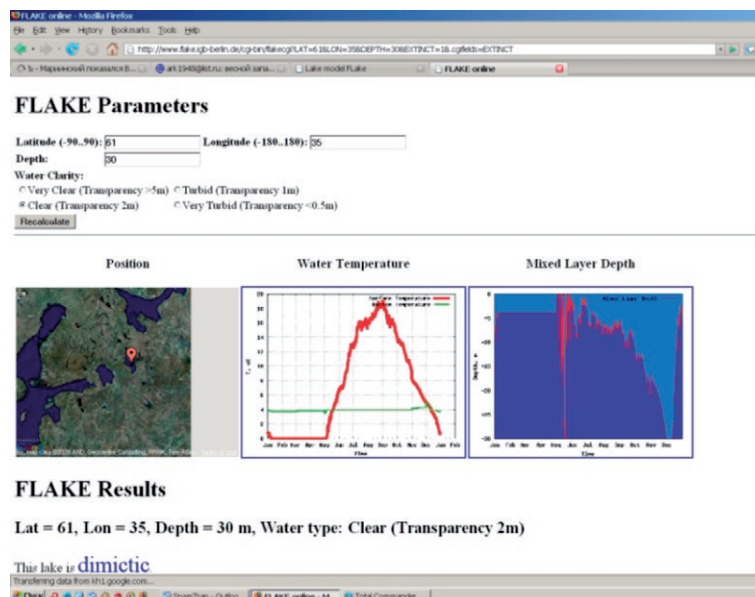


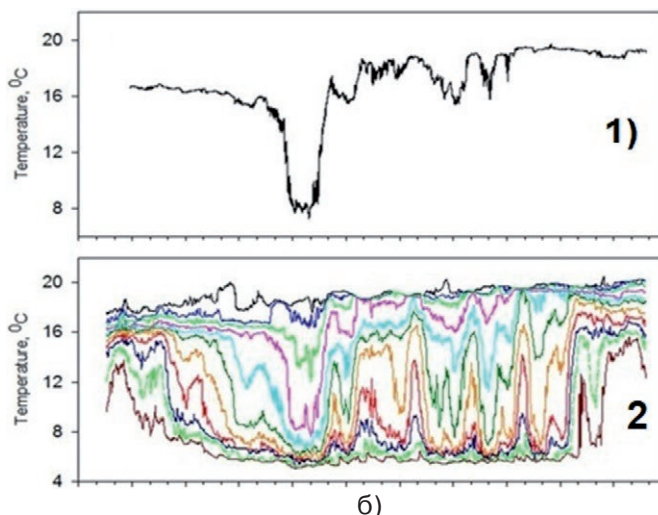
Рис. 15. Пример страницы модели Flake (<http://lakemodel.net>; <http://nwpi.krc.Karelia.ru/flake>)

Fig. 15. Flake model sample page (<http://lakemodel.net>; <http://nwpi.krc.Karelia.ru/flake>)



1. Бабине, 2. Онтарио, 3. Мичиган, 4. Сенека, 5. Лох-Несс, 6. Женевское, 7. Цюрих, 8. Лугано, 9. Балдегг, 10. Констанс, 11. Ладога, 12. Онего, 13. Севан, 14. Киннерет, 15. Байкал, 16. Бива, 17. Чапала.

а)



б)

Рис. 16. Схема расположения озер, использованных для анализа нелинейных внутренних волн (а). Пример изменений температуры воды, характеризующих бор на термоклине (б, 1) и внутренних волн на разных горизонтах в Онежском озере (б, 2)

Fig. 16. Locations of the lakes used for the analysis of non-linear internal waves (a). An example of water temperature changes characteristic of a bore at the thermocline (б, 1) and internal waves at different horizons in Lake Onego (б, 2)

ве озерного модуля для модели регионального климата Канады (рис. 15).

FLake была применена как физический модуль в моделях экосистем ряда озер [Mironov et al., 2010; Golosov et al., 2012].

Нелинейные внутренние волны в озерах мира

В ИВПС КарНЦ РАН организованы и проведены экспериментальные исследования нелинейных внутренних волн (НВВ) в Онежском озере. Совместно с коллегами из России, Германии, Украины и Великобритании по гранту ИНТАС (рук. проф. К. Хуттер) выполнено обобщение натурных исследований [Филатов и др., 2011] и результатов моделирования нелинейных внутренних волн в озерах мира (рис. 16, а).

Получены новые данные о генерации, разрушении и взаимодействии нелинейных внутренних волн по результатам комплексных экспериментов на Онежском озере (рис. 16, б). В крупном стратифицированном озере за счет взаимодействия крупномасштабных внутренних волн Кельвина и рельефа дна озера, нелинейных эффектов в термоклине могут генерироваться прогрессивные нелинейные одиночные (уединенные) внутренние волны типа бора на термоклине с амплитудой порядка 10 метров и короткопериодные НВВ (солитоны), проявляющиеся на локальных участках озера. В относительно узких ($R_R \geq L$) стратифицированных озерах уединенные НВВ после генерации внутренней общеозерной сейши могут распро-

страняться по всему озеру, причем в озерах правильной формы (Лох-Несс) после отражения от берега постепенно затухают, а в узких озерах сложной конфигурации (Бабин, Сенека) отмечаются только в одном направлении [Филатов и др., 2011; Filatov et al., 2012].

Международные мультидисциплинарные исследования подледного режима Онежского озера. Проект «Lake Ladoga: Life Under Ice Interplay of Under-Ice Processes By Global Change»

Отсутствие знаний о процессах в Онежском и Ладожском озерах при ледоставе не позволяло корректно оценить сезонные и многолетние изменения экосистем этих озер и дать надежный прогноз их возможных изменений при климатических и антропогенных воздействиях. В 2015–2017 гг. проведены комплексные междисциплинарные российско-швейцарские (при участии около 70 сотрудников из 17 организаций 9 стран мира) исследования жизни подо льдом Онежского озера. Такие же исследования не удалось выполнить на Ладожском озере вследствие невозможности проведения работ из-за опасной ледовой обстановки при потеплении климата. На рис. 17 представлены схема подпроектов «Life Under Ice Interplay of Under-Ice Processes By Global Change» и специальное издание результатов исследований в журнале *SIL J. Inland Waters*.

Результаты исследований свидетельствуют о серьезных потенциально опасных для экоси-

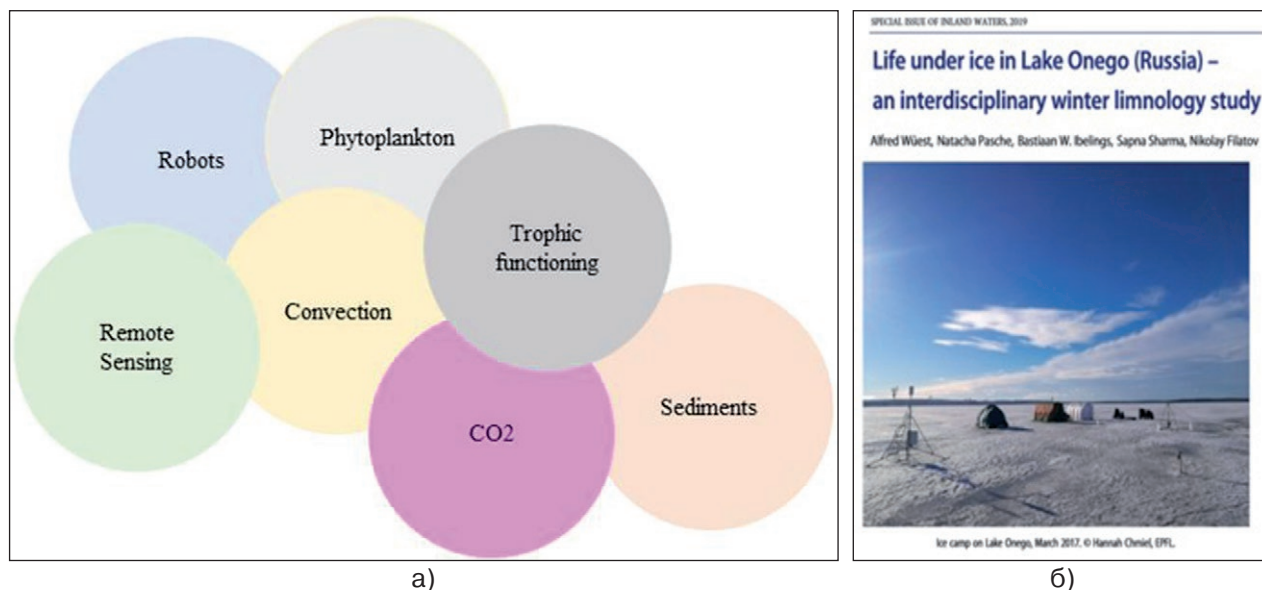


Рис. 17. Схема разделов проекта «Life Under Ice Interplay of Under-Ice Processes By Global Change» (a) и специальное издание результатов исследований в журнале Inland Waters, 2019 (б)

Fig. 17. Chart of the “Life Under Ice Interplay of Under-Ice Processes By Global Change” project units (a), and a special edition of the research results in the Inland Waters Journal, 2019 (б)

стем озер последствиях быстрого потепления климата в 1990–2018 гг. и связанного с этим сокращения ледяного покрова на Ладожском и Онежском озерах [Filatov et al., 2019]. Изучена динамика конвективного перемешанного слоя и проанализирована ее роль в последующем развитии биоты подо льдом. Показано, что режим развитой турбулентности на ранней стадии летнего прогрева озера играет важную роль в процессах переноса и перемешивания растворенных и взвешенных веществ, в частности, в поддержании тяжелых клеток водорослей в фотической зоне [Bogdanov et al., 2019].

В период ледостава в Онежском озере выявлено 58 видов фитопланктона и 25 видов зоопланктона. При малой прозрачности вод, неглубокой (несколько метров) эвфотической зоне в Онежском озере солнечная радиация является ключевым ресурсом, ограничивающим рост фитопланктона в озере. Были оценены параметры, характеризующие цикл метана в Петрозаводской губе Онежского озера. Оценен приток и сток парниковых газов, таких как метан и CO_2 . Показано, что измерение CO_2 только в пелагических водах больших озер может не позволить корректно оценить его баланс в озерах. Воды центральной части Онежского озера и Большого Онега сохранили олиготрофный статус по всем химическим параметрам. Исследования поддержаны фондом ELEMO (Швейцария) [Wüest et al., 2019].

Оценка состояния сложных эколого-социально-экономических систем и развитие научных основ управления ресурсами Европейского Севера России

Экспертная система для оценки состояния экосистем северных морей на примере Белого моря

Экспертная система (ЭС) разработана и совершенствуется совместно с ИПМИ КарНЦ РАН и ИВМ РАН. Реализуются идеи академиков В. П. Дымникова и А. С. Саркисяна (ИВМ РАН) о ее создании на основе собственных российских программных продуктов с использованием 3D-модели термогидродинамики, разработанной в ИВМ РАН. В ИВПС для Белого моря и водосбора (Беломорья) была создана информационная основа, проведены полевые эксперименты для калибровки и верификации ЭС. В рамках проектов «Мировой океан», программ Президиума РАН «Арктика», грантов РФФИ, INKO-Copernicus, INTAS и госзаданий проведены многолетние комплексные исследования Белого моря, созданы БД (2010), ГИС (2017), электронная и бумажная версии атласа (2017) «Белое море и водосбор», при участии коллег из других организаций (ИО РАН, ААНИИ, ММБИ, МГУ им. Ломоносова, Международного центра дистанционных методов и окружающей среды им. Нансена) выполнено обобщение собранных комплексных сведений в монографиях [Filatov et al., 2005; Белое..., 2007].

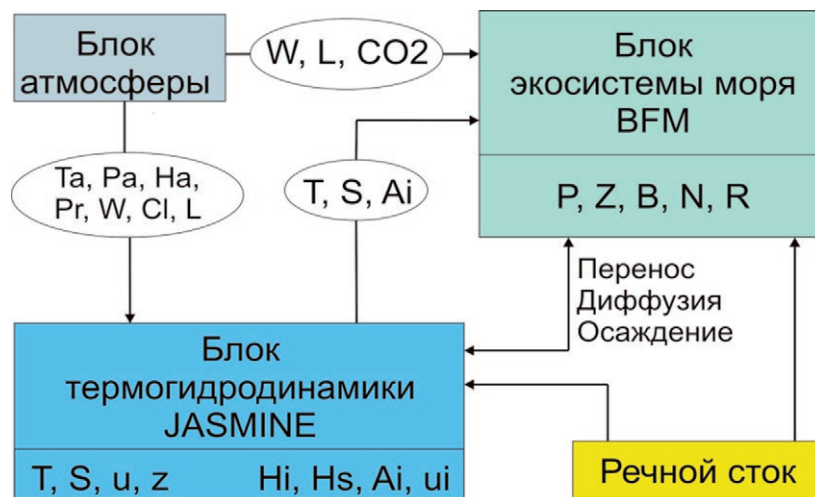


Рис. 18. Схема блоков модели JASMINE:

W – скорость ветра, L – освещенность, CO_2 – углекислый газ в атмосфере, T_a – температура воздуха, P_a – давление на уровне моря, H_a – влажность воздуха, P_r – осадки, Cl – облачность, T – температура воды, S – соленость, u – векторная скорость течений, z – уровень моря, H_i – количество льда, H_s – количество снега, A_i – сплоченность морского льда, u_i – векторная скорость дрейфа льда, P – характеристики фитопланктона, Z – зоопланктона, B – бактериопланктона, N – концентрации биогенного неорганического вещества, R – концентрации и характеристики неживой органики [Chernov et al., 2018]

Fig. 18. JASMINE model blocks chart:

W – wind speed, L – light, CO_2 – atmospheric carbon dioxide, T_a – air temperature, P_a – sea-level pressure, H_a – air humidity, P_r – precipitation, Cl – cloudiness, T – water temperature, S – salinity, u – vector current velocity, z – sea level, H_i – amount of ice, H_s – amount of snow, A_i – sea ice concentration, u_i – vector ice drift velocity, P – characteristics of phytoplankton, Z – zooplankton, B – bacterioplankton, N – concentrations of biogenic inorganic matter, R – concentrations and characteristics of non-living organic matter [Chernov et al., 2018]

В качестве основы при разработке ЭС использована 3D-модель FEMAO, ранее созданная для Ледовитого океана в ИВМ РАН Н. Г. Яковлевым [2009]. В 2014–2020 гг. в Институтах прикладных математических исследований КарНЦ РАН (И. А. Чернов), водных проблем Севера КарНЦ РАН (А. В. Толстиков) и вычислительной математики РАН (Н. Г. Яковлев) создан модельный комплекс JASMINE («Моделируем Белое море»: [https://sites.google.com/site/modeling the White sea](https://sites.google.com/site/modeling%20the%20White%20sea)), который является основой создаваемой ЭС (рис. 18).

ИВПС КарНЦ РАН при создании ЭС является ответственным за разработку информационной основы модели [Филатов и др., 2014], организацию и проведение полевых экспериментов для калибровки и верификации модели [Толстиков и др., 2019]. ЭС включает набор 3D математических моделей и постоянно обновляемую базу данных для экспертной оценки состояния экосистем Белого моря. Система предназначена для поддержки принятия управленческих решений.

Модель JASMINE совмещена с европейской моделью BFM (Biogeochemical Flux Model: <http://bfm-community.eu>). Предлагаемая ЭС может быть использована в задачах мониторинга, рационального использования и управления ресурсами морских и пресноводных

объектов, используется при разработке когнитивной модели эколого-социо-экономической системы Белого моря и водосбора [Толстиков, Чернов, 2019; Chernov et al., 2020].

Исследования эколого-социо-экономической системы Белого моря и водосбора

ИВПС КарНЦ РАН совместно с Институтом проблем региональной экономики РАН (проф., д. б. н. В. В. Меншуткин), Институтом леса КарНЦ РАН (чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет) и Институтом экономики КарНЦ РАН (д. э. н. П. В. Дружинин) выполняет системные исследования социо-эколого-экономических процессов Белого моря и водосбора как части Арктической зоны РФ, основной целью которых является оценка влияния изменений экономики, окружающей среды, климата на состояние экосистемы Белого моря, социальную сферу и условия проживания населения. Создано необходимое информационное обеспечение: геоинформационные системы; базы данных; комплексный электронный и бумажный атласы Белого моря и его водосбора, оригинальные 3D математические модели термогидродинамики и экосистемы моря (JASMINE), изучены зако-

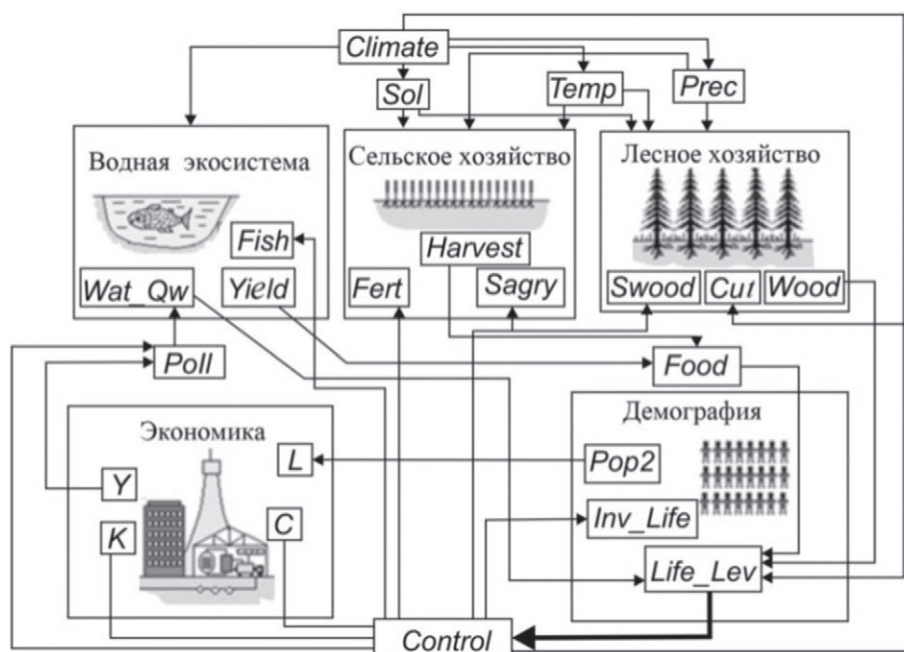


Рис. 19. Общая блок-схема эколого-социо-экономической модели региона:

Y – валовой региональный продукт, K – капитал или производственные фонды, L – численность работоспособного населения, C – потребление, Inv – инвестиции [Меншуткин, Филатов, 2021]

Fig. 19. Overall flowchart of the region's ecologo-socio-economic model:

Y – gross regional product, K – capital or production assets, L – able-bodied population size, C – consumption, Inv – investments [Menshutkin, Filatov, 2021]

номерности изменений климата, гидрологических условий и рыболовства – основного занятия местного населения, используются модели для оценки состояния и прогноза развития экономики региона (рис. 19). Разработанные подмодели относятся к различным областям знания (экономика, демография, океанология, почвоведение и агрофизика). Продemonстрирована динамика элементов модели за 100 лет.

Когнитивная модель системы дает возможность определения разных целевых показателей, направленных на оценку возможностей повышения уровня жизни населения, рационального использования и охраны окружающей среды, развитие социальной сферы Беломорья, важных для достижения устойчивого развития региона [Меншуткин и др., 2018]. Результаты могут служить основой для построения моделей, необходимых при разработке систем поддержки принятия управленческих решений. Когнитивная модель Белого моря рассматривается как инструмент для синтеза разнородной информации о сложной эколого-социо-экономической системе. Применяется концептуальное моделирование и математический аппарат непрерывной или размытой логики.

В отличие от традиционных когнитивных моделей в настоящей предусматривается из-

менение переменных во времени за 100 лет, что позволяет описать связь агентов взаимодействия и охарактеризовать механизмы их взаимной адаптации. Временной шаг модели принят равным одному году. Показано, что экономические параметры мало зависят от изменений климата, в то время как эти изменения оказывают заметное влияние на уровень жизни населения, экосистему Белого моря, которые проявляются в колебаниях температуры воды, биомассе фито- и зоопланктона, вылове рыб, но малозаметны в изменениях бентоса. Показана зависимость оттока населения Беломорья от размеров валового регионального продукта, наличия производственных фондов и качества воды [Меншуткин и др., 2018; Меншуткин, Филатов, 2020].

Примеры практических разработок ИВПС КарНЦ РАН

Специализированная геоинформационная система «Водные объекты Республики Карелия»

Разработана совместно с ПетрГУ и внедрена в органы управления Республики Карелия как подсистема единой ГИС «Современное

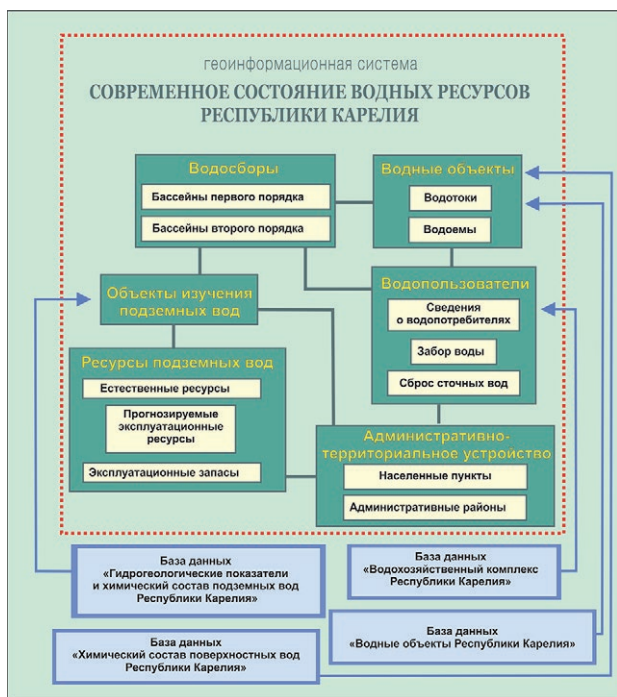


Рис. 20. ГИС «Водные объекты Республики Карелия» – один из инструментов общей системы управления водными ресурсами региона [Богданова и др., 2014]

Fig. 20. GIS “Republic of Karelia waters” – a tool in the unified system of regional water management [Bogdanova et al., 2014]

состояние водных ресурсов Республики Карелия», обеспечивающей формирование, ведение и представление тематической информации по водному фонду региона (рис. 20). Может служить прототипом для создания подобных ГИС других регионов РФ, для организаций, принимающих решения в сфере водных отношений [Богданова и др., 2014]. Свидетельство об официальной регистрации № 2011620139 от 16.02.2011.

Улучшение питьевого водоснабжения населения Карелии с использованием подземных вод

Выполненные ИВПС КарНЦ РАН исследования в сотрудничестве с другими организациями Карелии (Институтом геологии КарНЦ РАН, Карельской геологической экспедицией, Республиканской энергетической комиссией), Правительством РК и финскими партнерами из Центра окружающей среды Северного Саво (Куопио), Института вод и окружающей среды (SUKE), фирм «Земля и Вода» и Finmar (Хельсинки) при поддержке Министерства окружающей среды, лесного и сельского хозяйства Финляндии позволили существенно повысить

гидрогеологическую изученность региона, открыли возможность более широкого использования подземных вод в РК, а в ряде районов осуществить внедрение полученных знаний для решения практических задач.

Впервые созданы электронный и бумажный каталог озер и рек РК, информационная база данных о подземных водах, которая постоянно пополняется.

Исследования, осуществляемые в виде нескольких подпрограмм, успешно завершены, а полученные научные сведения имеют большое практическое значение для РК. В результате совместных карельско-финляндских многолетних исследований дана оценка запасов и качества подземных вод четвертичных отложений. Найдены запасы подземных вод высокого качества для снабжения населения Карелии в районе населенных пунктов Суоярви, Поросозеро, Калевала, Кижы, Пряжа, Лоухи, Надвоицы, Чупа (рис. 21).

Для всех рассмотренных пунктов подготовлены локальные программы развития, в которых показывается современное состояние водоснабжения, оцениваются потребности в воде на перспективу, дается анализ существующих проблем и предлагаются возможные принци-



Рис. 21. Разведанные месторождения подземных вод
Fig. 21. Proven groundwater fields

пиальные варианты, которые основаны на экономических расчетах. Качество подземных вод, как правило, соответствует требованиям нормативных документов. За период с 2008 по 2012 г. ИВПС провел разведку шести месторождений подземных вод с запасами от 150 до 2600 м³/сут. с внесением их в Государственный реестр. С учетом природных условий республики возможен перевод на подземное водоснабжение значительной части населенных пунктов (30–40 %), как и в соседней Финляндии, что значительно повлияло бы на снижение заболеваемости населения, в том числе и онкологией. Таким образом, сделан значительный вклад в важную задачу – улучшение питьевого водоснабжения населения республики [Водные..., 2006].

Комплексные атласы Республики Карелия и «Белое море и водосбор»

В 2020 г. ИВПС КарНЦ РАН при участии коллег из других институтов Карельского научного центра РАН, Петрозаводского государственного университета, Национального музея Республики Карелия разработал макет географического атласа Республики Карелия, который представлен в формате PDF на 45 стр. и содержит 66 карт в масштабах 1:2 000 000–1:6 000 000, а также фотографии, графики, схемы и разнообразную статистическую информацию о регионе (рис. 22). Большую помощь оказали ряд министерств и ведомств республики, которые предоставили данные. Атлас будет полезен научным работникам, преподавателям, студентам, школьникам, туристам, охотникам и рыбакам, руководителям разного уровня, жителям Республики Карелия.

Атлас «Белое море и водосбор»

При участии соисполнителей из ИГ КарНЦ РАН, ИПМИ, ИЭ, ИЯЛИ КарНЦ РАН, Географического факультета МГУ им. Ломоносова Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН составлен комплексный общегеографический атлас «Белое море и водосбор». Макет атласа создан на основе актуальной цифровой карты масштаба 1:1 000 000 и мелкомасштабных карт 1:2 000 000–1:6 000 000 для регионов, расположенных на водосборе Белого моря (Архангельская, Вологодская, Мурманская области, Республики Карелия и Коми, Ненецкий национальный округ). Это комплексное произведение, характеризующее актуальные сведения о природе, социо-экономике, населении, памятниках культуры и природы Беломорья (рис. 23).



Рис. 22. Обложка атласа Республики Карелия
Fig. 22. Cover of Atlas of the Republic of Karelia

Данная работа будет способствовать охране и рациональному использованию ресурсов Белого моря и его водосбора, важна при планировании экономической деятельности, развития туризма, рекреации, проектировании объектов экономики, ООПТ, для образовательной деятельности, а также для принятия управленческих решений, что очень важно в связи с активизацией деятельности в Арктике, Арктической зоне РФ. Работа выполнена по гранту РГО [Филатов и др., 2014; Толстиков и др., 2017].

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике

Сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН создано новое научно-методическое пособие, которое охватывает важнейшие аспекты современной практической гидрохимии [Аналитические..., 2017] (рис. 24). В нем дается подробное описание различных современных методик анализа воды и подходов к оценке состояния водных объектов с использованием химических данных, а также кинетических и расчетных методов. Обобщение выполнено по результатам анализа природных вод с использованием как российских, так и зарубежных подходов, а также результатов международного проекта по интеркалибрации гидрохимических методов «ICP Waters» (с 1999 по 2015 г.). Получены важные результаты межлабораторного сличения результатов анализа органического вещества, биогенных элементов в природных водах из 12



Рис. 23. Атлас «Белое море и водосбор»

Fig. 23. Atlas of the "White Sea and Drainage Basin"

лабораторий России. Представлены теоретические модели трансформации и внутриводоемного круговорота лабильных компонентов

в водной среде, принципы нормирования допустимой нагрузки на водные объекты с учетом их ассимиляционной способности и степени загрязнения вод, установленной по региональным ПДК. Рассмотрено применение информационных систем для обработки гидрохимической информации и обеспечения репрезентативности аналитических данных.

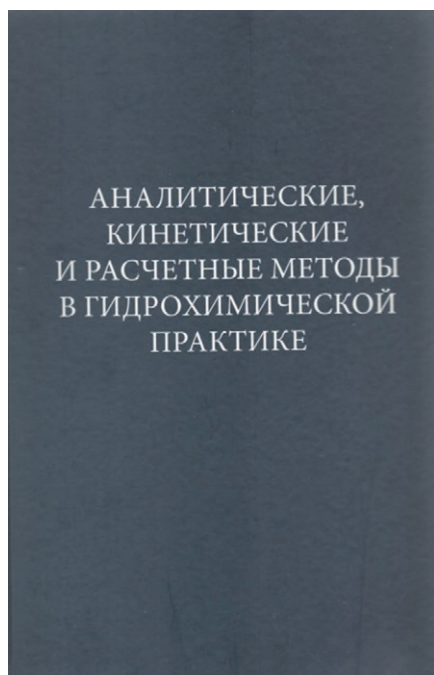


Рис. 24. Научно-методическое пособие, охватывающее важнейшие аспекты современной практической гидрохимии, созданное под ред. П. А. Лозовика и Н. А. Ефременко

Fig. 24. The guidebook covering the most important aspects of modern practical hydrochemistry, eds. P. A. Lozovik and N. A. Efremenko

Оценка диффузного поступления загрязняющих веществ из донных отложений Иваньковского водохранилища. Проект «Оздоровление Волги»

ИВПС КарНЦ РАН разработаны методические рекомендации для оценки неконтролируемого диффузного поступления загрязняющих веществ в водные объекты из донных отложений. Оценка внутренней нагрузки Иваньковского водохранилища базировалась на комплексном подходе с учетом гидрологических, гидродинамических, морфометрических особенностей водоема и типа загрязнения [Белкина и др., 2019]. Для Иваньковского водохранилища, которое является типичным представителем водохранилищ долинного типа, было показано, что взвешенное вещество (с которым в водных системах мигрирует большая часть тяжелых металлов и токсичных гидрофобных органических веществ, таких как нефтяные углеводороды) и биогенные элементы (во взвешенной и растворенной форме) являются основными загрязняющими компо-

нентами, поступающими из донных отложений обратно в воду. Общее поступление в водную толщу загрязняющих веществ за год в результате взмучивания донных отложений Иваньковского плеса в зависимости от ветровой ситуации и уровня режима вод оценивается в следующих пределах: всего твердых веществ 9400–34 600 т, из них 9–925 т фосфора и 2–35 т нефтяных углеводородов. Поступление фосфора в растворимой форме из донных отложений в воду в зоне седиментации и застойной зоне сравнимы по величине с внешней фосфорной нагрузкой [Гатальская, Белкина, 2020].

Работа выполнена по проекту «Оздоровление Волги»; раздел ИВПС КарНЦ РАН «Оценка диффузного поступления загрязняющих веществ из донных отложений Иваньковского водохранилища» [Белкина и др., 2019; Гатальская, Белкина, 2020].

Климат и комфортность проживания населения в Карелии

По запросу Комитета по региональной политике и проблемам Севера и Дальнего Востока Совета Федерации РФ выполнены оценки влияния климата на комфортность проживания населения Карелии [Назарова, Филатов, 2004; Назарова, 2011] в связи с рассмотрением Минэкономразвития РФ критериев и методических подходов для районирования территории РФ по природным условиям жизнедеятельности населения. По климатическому районированию территорию Восточной Финляндии относят к умеренно холодному климату с устойчивым снежным покровом зимой и избыточным увлажнением во все времена года. Комфортные климатические условия (температура воздуха 20 °С и относительная влажность воздуха 35–65 %) наблюдаются только в 3 % случаев. Устойчивого периода комфортных климатических условий в Карелии нет в связи с высокой влажностью и сравнительно низкими температурами. В среднем для Карелии число дней с относительной влажностью воздуха более 80 % в течение суток составляет за год 150–170, а с влажностью менее 30 % – всего 3–9 дней. Устойчивый период с температурой воздуха выше 15 °С по северу Карелии бывает только в теплые годы (обеспеченность менее 50 %). Резкие колебания метеорологических параметров оказывают сильное воздействие на организм человека и вызывают различные патологические состояния и обострение болезней. Данный аспект не учитывался в методике, предложенной Минэкономразвития РФ в 2003 г. Для Карелии характерна интенсивная

циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов, которые обуславливают значительную изменчивость, порой даже в течение суток, значений метеорологических элементов и параметров. Суточные амплитуды колебаний температуры воздуха могут достигать 20–22 °С, атмосферного давления – 38–40 гПа. Теоретически возможная продолжительность солнечного сияния (ПСС) в Карелии составляет 4530 час/год. Однако действительное ее значение из-за пасмурной погоды, повторяемость которой за год – 69 % по общей и 48 % по нижней облачности, составляет 37 % возможной и равна в среднем 1674 ч. В Петрозаводске за год наблюдается в среднем 119 дней без солнца.

При районировании территории по комфортности и дискомфорта проживания населения важно использовать как зональный принцип районирования, который в своей основе учитывает преимущественно распространение растительных зон (индекс вегетации), так и азональный. При таком подходе будут более корректно учитываться особенности геолого-тектонического строения, рельефа, что непосредственно оказывает формирующее влияние на ландшафтную структуру, в том числе и на растительность. Имеющийся опыт дает основание считать универсальным для территориального эколого-географического анализа геосистемный, или ландшафтно-географический, принцип, основанный на ландшафтной структуре территории. В соответствии с указанными критериями территорию Карелии следует отнести к районам с некомфортными условиями проживания. Результаты представлены в Комитет по региональной политике и проблемам Севера и Дальнего Востока в Совете Федерации РФ (В. Н. Пивненко) и доложены на заседании комитета Совета Федерации РФ [Назарова, Филатов, 2004; Назарова, 2011].

Участие в работах по совершенствованию законодательства для сохранения экосистем водоемов

ИВПС КарНЦ РАН в 2014–2020 гг. принимал участие в деятельности рабочей группы Законодательного собрания РК по разработке проекта Закона об охране экосистем Ладожского и Онежского озер. Институтом высказано мнение, что для реализации разрабатываемого закона потребуется создание федеральной целевой программы, как это сделано для реализации Закона об охране озера Байкал, или приоритетного проекта, как для решения проблем р. Волги. Разрабатываемый закон

должен учитывать огромный потенциал природных ресурсов озер (ассимиляционный потенциал), существенно превосходящий относительно небольшие затраты на реализацию ФЦП. На основе многолетних исследований Ладожского и Онежского озер рекомендовано уменьшить поступление биогенных элементов: для Ладожского озера до уровня 1800 т Р/год, что более чем на четверть меньше нагрузки, имевшей место до 1962 г., а для Онежского озера фосфорная нагрузка должна быть менее 600 т Р/год. Рекомендовано строительство и совершенствование комплексов очистных сооружений в населенных пунктах на берегах озер, снижение поступления $P_{\text{общ}}$ с очистных сооружений, использование наилучших водоохраных технологий. Необходима регламентация рыбоводства на озерах из-за интенсивного развития товарного форелеводства; продолжение работ по совершенствованию законодательства в области охраны и рационального использования ресурсов озер. Требуется разработка систем для принятия управленческих решений, основанных на научных знаниях и современных информационных технологиях. Необходимо совершенствование системы наблюдений (мониторинга) и прогнозирования состояния водных экосистем при разных сценариях изменений климата и антропогенного влияния.

Сведения о состоянии и возможных изменениях экосистем крупнейших пресноводных озер Европы Ладожского и Онежского представлены рабочей группе Законодательного собрания Республики Карелия (2014–2019 гг.) [Филатов, 2017]. Ежегодно ИВПС КарНЦ РАН дает информацию о водных объектах Севера ЕЧР Министерству природных ресурсов и экологии РК, которые публикуются в специализированных сборниках о состоянии окружающей среды. Сотрудники ИВПС выступали на заседаниях Госдумы и Федерального Собрания РФ с сообщениями о состоянии водных объектов Севера. ИВПС предоставляет сведения о состоянии и возможных изменениях экосистем озер по запросам ОНЗ РАН и Совета безопасности РФ. Институт участвует в работе Советов: по водным ресурсам при ОНЗ РАН, глобальной экологии при Президиуме РАН; Экспертных Советов: РГО, Президентских проектов и программ, РФФИ, РАН и Минобрнауки и высшего образования РФ. Сотрудники ИВПС участвуют в работе редколлегий научных журналов и в деятельности международных организаций Northern Research Basins (NRB) и Society International Limnology (SIL), а также в деятельности Русского географического общества.

Примеры проектов, по которым получены важные фундаментальные и практические результаты

- «Распространение микрочастиц антропогенных полимеров (микропластика) и ассоциированных с ними тяжелых металлов и их соединений в крупных водных объектах суши (на примере Онежского озера)», грант РНФ 19-17-00035. 2019–2021 гг. Рук. к. т. н. М. Б. Зобков.
- «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях», грант РНФ № 14-17-00740. 2014–2018 гг. Рук. чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов.
- «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние», грант РНФ № 14-18-00766. 2014–2016 гг. Рук. д. г. н. Д. А. Субетто.
- «Палеолимнология Онежского озера: строение, процессы накопления и трансформация донных отложений», грант РНФ № 14-17-00766. 2018–2020 гг. Рук. д. г. н. Д. А. Субетто.
- Грант ИНТАС «FLake» (<http://lakemodel.net>, зеркало на <http://nwpi.krc.karelia.ru/flake>). Разработанная ранее озерная модель FLake внедрена в численный прогноз погоды для Европы. Рук. от ИВПС к. т. н. А. Ю. Тержевик.
- «Устойчивое многофункциональное использование водных ресурсов Севера РФ, зарубежных стран». Проект Минэкономразвития РК. Рук. от ИВПС чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов.
- Проект разработки научно-исследовательского судна «Полярный Одиссей» для исследований и мониторинга Арктики, который вошел в программу совместной реализации наиболее перспективных проектов в рамках сотрудничества Санкт-Петербурга и Республики Карелия (Минэкономразвития РК). Рук. от ИВПС чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов.

Примеры баз данных, созданных ИВПС КарНЦ РАН

- «Белое море и его водосбор». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2010620435 от 16.08.2010 г. Авторы: Толстикова А. В., Филатов Н. Н., Здореннов Р. Э.
- «Визуализация и сравнение результатов моделирования термохалинных и гидродинамических полей Белого моря». Свидетельство об официальной регистрации программ

для ЭВМ № 2014618474 от 21.08.2014 г. Авторы: Чернов И. А., Толстиков А. В.

- «Водные объекты Республики Карелия». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620139 от 16.02.2011. Авторы: Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С.
- «Водные ресурсы Европейского Севера России и их использование». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621558 от 18.01.2017. Авторы: Богданова М. С., Филатов Н. Н., Литвиненко А. В.
- «Водохозяйственный комплекс Республики Карелия». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620136 от 16.02.2011. Авторы: Литвиненко А. В., Богданова М. С., Филатов Н. Н.
- «Гидрологические характеристики озер России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621718 от 02.11.2018. Авторы: Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Богданова М. С., Балаганский А. Ф.
- «Макрозообентос Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620882 от 31.08.2012. Автор: Полякова Т. Н.
- «Озера Карелии». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620137. 2011 г. Авторы: Филатов Н. Н., Кухарев В. И., Потахин М. С.
- «Планктон пелагиали Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620274 от 13.02.2015. Авторы: Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А.
- «Ресурсный потенциал кормовой базы Онежского озера: фитопланктон Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621090 от 16.07.2018. Автор: Чекрыжева Т. А.
- «Сток рек бассейна Белого моря». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621833 от 19.11.2018 г. Авторы: Карпечко В. А., Махальская Н. И., Балаганский А. Ф., Толстиков А. В.
- «Хлорофилл «а» в воде Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621068 от 13.07.2018. Авторы: Сабылина А. В., Теканова Е. В., Калинкина Н. М.
- «Электронный атлас Белого моря и его водосбора». Свидетельство о регистрации базы данных № 2017620252 от 01.03.2017. Авторы: Толстиков А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С., Литвиненко А. В., Карпечко В. А., Дерусова О. В., Балаганский А. Ф.

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Белкина Н. А. Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019 г. Т. 5(15), вып. 4. С. 263–276.

Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Онежского озера // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2015. № 173. С. 97–109.

Белкина Н. А., Казмирук В. Д., Потахин М. С. Поступление фосфора из донных отложений Иваньковского водохранилища в составе взвешенного вещества // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Междунар. конф. Казань: АН РТ, 2019. Ч. 2. С. 33–38.

Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.

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

Богданова М. С., Литвиненко А. В., Филатов Н. Н. ГИС «Водные объекты Республики Карелия» как инструмент для решения задач управления водными ресурсами и их использования. Ростов-на-Дону, 2014. С. 45–49.

Бородулина Г. С., Каменский И. Л., Скиба В. И., Токарев И. В. Закономерности формирования железистых минеральных вод курорта «Марциальные воды» (Карелия) по изотопно-геохимическим данным // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ. 2020. № 17. С. 61–65. doi: 10.31241/FNS.2020.17.011

Бородулина Г. С., Левичев М. А., Субетто Д. А. Оценка использования ресурсного потенциала подземных вод Республики Карелия // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 4. С. 152–156.

Водные ресурсы и проблема питьевого водоснабжения. Опыт сотрудничества Карелии и Финляндии / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Саркиоя, Р. Портикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск; Куопио, 2006. 263 с.

Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н., Дианский Н. А., Гусев А. Н. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 3–16. doi: 10.17076/lim480

Гатальская Е. В., Белкина Н. А. Особенности накопления фосфора в донных отложениях Иваньковского водохранилища // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6(16), № 4. С. 139–153. doi: 10.37279/2309-7663-2020-6-2-139-153

Голосов С. Д., Зверев И. С., Шипунова Е. А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ) // Диагноз и прогноз термогидродинамики

и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 166–196.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Волков С. Ю., Богданов С. Р., Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Зверев И. С., Здоровеннов Р. Э. Динамика вод небольшого озера в период открытой воды (по данным измерений течений и температуры) // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2018. Т. 4(14), вып. 3. С. 54–68.

Зобков М. Б. Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2012. 178 с.

Исаев А. В., Савчук О. П. Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества // *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России* / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 197–208.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. 289 с.

Калинкина Н. М., Белкина Н. А. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов // *Принципы экологии*. 2018. № 2. С. 56–74. doi: 10.15393/j1.art. 2018.7643

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2019. № 1. С. 62–72. doi: 10.31857/S2587-55662019162-72

Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Балаганский А. Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // *Региональная экология*. 2018. № 2(52). С. 7–15.

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

Карпечко Ю. В., Нестеренко И. М. Водный и тепловой режим осушаемых болот и заболоченных земель Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1996. 118 с.

Кауфман З. С. Происхождение биоты континентальных водоемов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. 258 с.

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С. Водохозяйственная ситуация в Республике Карелия: современное состояние и динамика // *Водное хозяйство России*. 2019. № 2. С. 31–47.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–592.

Лозовик П. А. Оценка ассимиляционной способности к фосфорной и органической нагрузкам и нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты по кинетической и гидрогеохимической моделям // *Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 88–95.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // *Труды КарНЦ РАН*. 2011. № 4. С. 21–28.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Моделирование оптимального управления эколого-социо-экономической системой водоем-водосбор на примере Беломорья // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 3. С. 506–515. doi: 10.31857/S0321059620030116

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Моделирование эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора // *МГИ*. 2021. № 1. С. 662–680. doi: 10.22449/0233-7584-2021-1-532-544

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Дружинин П. В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // *Арктика. Экология и экономика*. 2018. № 2(30). С. 79–85. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-4-17

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии». 1. Ординарные и номинальные признаки озер // *Водные ресурсы*. 2009а. Т. 36, № 2. С. 160–171.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии». 2. Классификация озер // *Водные ресурсы*. 2009б. Т. 36, № 3. С. 300–311.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии» // *Озера Карелии. Справочник* / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Назарова Л. Е. Об оценке комфортности климата Карелии // *Труды КарНЦ РАН*. 2011. № 4. С. 129–133.

Назарова Л. Е., Филатов Н. Н. О комфортности климата Карелии // *Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты* / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 193–204.

Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 461 с.

Румянцев В., Филатов Н. Состояние Ладожского и Онежского озер требует принятия срочных мер по сохранению их ресурсов и восстановлению экосистем // *Вода Magazine*. 2018. № 10(134). С. 40–44.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Озера и климат: модели и методы // *Модели и методы в проблеме вза-*

имодействия атмосферы и гидросферы: учебное пособие / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкосова, Е. П. Гордова. Томск: ТГУ, 2014. С. 256–326.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н., Терзевик А. Ю., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Мальгин А. Н., Петрова Н. А., Полосков В. Н., Белкина Н. А., Ефремова Т. В., Назарова Л. Е., Сало Ю. А., Сабылина А. В., Тимакова Т. М. Онежское озеро сегодня и завтра: опыт математического моделирования // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 127–153.

Рыжаков А. В. Круговорот азотсодержащих веществ в природных водах // Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. С. 86–88.

Текастов Е. В., Калинкина Н. М., Кравченко И. Ю. Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 90–100. doi: 10.7868/S2587556618010083

Терзевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Волков С. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 10. С. 17–27. doi: 10.17076/lim712

Толстиков А. В., Чернов И. А. Изменчивость биогеохимических процессов в Белом море для разных климатических условий по данным моделирования // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 6. С. 92–102. doi: 10.17076/eb950

Толстиков А. В., Чернов И. А., Мурзина С. А., Мартынова Д. М., Яковлев Н. Г. Разработка комплекса Green JASMINE для изучения и прогнозирования состояния экосистем Белого моря // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 5. С. 23–32. doi: 10.17076/eb501

Филатов Н. Н. Новый географический атлас Карелии // Современные проблемы четвертичной геологии и географии Северо-Запада европейской части России и сопредельных стран: Матер. науч. сессии (с участием иностранных специалистов), посв. 100-летию со дня рождения Г. С. Бискупэ (Петрозаводск, 9–10 марта 2017 г.) / Под ред. Т. С. Шелеховой. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 75–77.

Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А., Назарова Л. Е., Синюкович В. Н. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // ДАН. 2016а. Т. 467, № 5. С. 589–593.

Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Назарова Л. Е. Внутривековая изменчивость уровня воды великих озер Евразии и Северной Америки // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020а. С. 96–100.

Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Назарова Л. Е., Пальшин Н. И., Руховец Л. А., Толстиков А. В., Шаров А. Н. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на измене-

ния климата // ДАН. 2012. Т. 444, № 5. С. 554–557. doi: 10.1134/S1028334X1206013X

Филатов Н. Н., Здорovenнов Р. Э., Терзевик А. Ю., Хуттер К. Нелинейные внутренние волны в крупном озере // ДАН. 2011. Т. 441, № 5. С. 1–4.

Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Богданова М. С. Современное состояние и динамика водного хозяйства субъектов Российской Федерации на территории бассейна Белого моря // Арктика. Экология и экономика. 2020б. № 4(40). С. 19–33. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-19-33

Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Богданова М. С., Карпечко В. А. Водные ресурсы Северного экономического района России: состояние и использование // Водные ресурсы. 2016б. Т. 43, № 5. С. 502–514.

Филатов Н. Н., Толстиков А. В., Богданова М. С., Литвиненко А. В., Меншуткин В. В. Создание информационной системы и электронного атласа по использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика. Экология и экономика. 2014. № 3(15). С. 18–29.

Шаров А. Н., Толстиков А. В. Гидрологический и биологический режимы озер Восточной Антарктиды // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3(3). С. 77–86. doi: 10.23859/estr-200318

Яковлев Н. Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 1–16.

Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland Waters. 2019. Vol. 9, iss. 2: Life under Ice in Lake Onego (Russia) – An Interdisciplinary Winter Limnology Study. P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Yakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // J. Mar. Syst. 2018. Vol. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006

Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: available data and numerical models // Geosci. 2020. Vol. 10. Art. 463. doi: 10.3390/geosciences10110463

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O., Pettersen L., Bobilev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. London: Springer-Praxis, 2005. 472 p.

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in-situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Filatov N., Terzhevik A., Zdorovennov R., Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K. Strongly nonlinear internal waves in lakes: generation, transformation // Field Studies of Non-Linear Internal Waves in Lakes on the Globe. Ch. 2. Springer, 2012. P. 25–106.

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // J. Great Lakes Res. 2020. Vol. 46. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

Ladoga and Onego – Great European lakes. Observations and modeling / Eds. L. Rukhovets, N. Filatov. Springer, 2010. 302 p.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V. Transformation and cycle of labile substances and production-destruction processes in lake ecosystems // J. Siberian Fed. Univ. Biol. 2017. Vol. 10(4). P. 404–421.

Mironov D., Heise E., Ritter B., Kourzeneva E., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. Vol. 15. P. 218–230.

References

Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. Eds. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 272 p.

Belkina N. A. Osobennosti protsessov transformatsii organicheskogo veshchestva v donnykh otlozheniyakh ozer Karelii i ego vliyaniye na khimicheskii sostav pridonnykh vod [Features of the process of transformation of organic matter in bottom sediments of lakes in Karelia and its impact on the chemical composition of bottom waters]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]. 2019. Vol. 5(15), iss. 4. P. 263–276.

Belkina N. A. Fosfor v donnykh otlozheniyakh Onezhskogo ozera [Phosphorus in bottom sediments of Lake Onego]. *Izvestiya RGPU im. A. I. Gertsena* [Izvestia: Herzen Univ. J.]. 2015. No. 173. P. 97–109.

Belkina N. A., Kazmiruk V. D., Potakhin M. S. Postuplenie fosfora iz donnykh otlozhenii Ivan'kovskogo vodokhranilishcha v sostave vzheshennogo veshchestva [Phosphorus inflow from bottom sediments of the Ivan'kovskoye reservoir in the suspended matter]. *Ozera Evrazii: probl. i puti ikh resheniya: Mater. II Mezhdunar. konf.* [Lakes of Eurasia: probl. and solutions: Proceed. II int. conf.]. Kazan': AN RT, 2019. Pt. 2. P. 33–38.

Beloe more i vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment under climatic and man-induced impact]. Eds. N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevik. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 335 p.

Bioresursy Onezhskogo ozera [Biological resources of Lake Onego]. Eds. V. I. Kukharev, A. A. Lukin. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 272 p.

Bogdanova M. S., Litvinenko A. V., Filatov N. N. GIS "Vodnye ob'ekty Respubliki Kareliya" kak instrument dlya resheniya zadach upravleniya vodnymi resursami i ikh ispol'zovaniya [GIS Water bodies of the Republic of Karelia as a tool for solving problems of water resources management and their use]. Rostov-na-Donu, 2014. P. 45–49.

Borodulina G. S., Kamenskii I. L., Skiba V. I., Tokarev I. V. Zakonomernosti formirovaniya zhelezistyykh mineral'nykh vod kurorta "Martsial'nye vody" (Kareliya) po izotopno-geokhimicheskim dannym [Regularities

Savchuk O. P. Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016 // Front. Mar. Sci. 2018. doi: 10.3389/fmars.2018.00095

Strakhovenko V., Subetto D., Ovdina E., Belkina N., Efremenko N. Distribution of elements in iron-manganese formations in bottom sediments of Lake Onego (NW Russia) and small lakes (Shotozero and Surgubskoe) of adjacent territories // Minerals. 2020. No. 10(5). Art. 440.

Wüest A., Pasche N., Ibelings B. W., Sharma S., Filatov N. Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study // Inland Waters. Vol. 9, no. 2. 128 p. doi: 10.1080/20442041.2019.1634450

Поступила в редакцию 19.03.2021

of the formation of ferruginous mineral waters of the resort "Marcial waters" (Karelia) according to isotope-geochemical data]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs* [Proceed. Fersman Sci. Session of the State Institute of the KSC]. 2020. No. 17. P. 61–65. doi: 10.31241/FNS.2020.17.011

Borodulina G. S., Levichev M. A., Subetto D. A. Otsenka ispol'zovaniya resursnogo potentsiala podzemnykh vod Respubliki Kareliya [Assessment of the use of the resource potential of groundwater in the Republic of Karelia]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Terra Humana]. 2017. No. 4. P. 152–156.

Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii [Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. 255 p.

Filatov N. N. Novyi geograficheskii atlas Karelii [A new geographical atlas of Karelia]. *Sovr. probl. chetvertichnoi geol. i geografii Severo-Zapada evropeiskoi chasti Rossii i sopredel'nykh stran*: Mater. nauch. sessii (s uchastiem inostrannykh spetsialistov), posv. 100-letiyu so dnya rozhdeniya G. S. Biske (Petrozavodsk, 9–10 marta 2017 g.) [Current problems of the Quaternary geology and geography of the North-West of the European part of Russia and neighboring countries: Proceed. sci. sessions (with int. part.), dedicated. 100th anniv. of the birth of G. S. Biske (Petrozavodsk, March 9–10, 2017)]. Ed. T. S. Shelekhova. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 75–77.

Filatov N. N., Vyruchalkina T. Yu., Dianskii N. A., Nazarova L. E., Sinyukovich V. N. Vnutrivenkovaya izmenchivost' urovnya krupneishikh ozer Rossii [The interdecadal variability of the level in the largest lakes of Russia]. *DAN* [Dokl. Acad. Sci.]. 2016a. Vol. 467, no. 5. P. 589–593.

Filatov N. N., Vyruchalkina T. Yu., Nazarova L. E. Vnutrivenkovaya izmenchivost' urovnya vody velikikh ozer Evrazii i Severnoi Ameriki [The interdecadal variability of the water level of the great lakes of Eurasia and North America]. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* [Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020a. P. 96–100.

- Filatov N. N., Georgiev A. P., Efremova T. V., Nazarova L. E., Pal'shin N. I., Rukhovets L. A., Tolstikov A. V., Sharov A. N. Reaktsiya ozer Vostochnoi Fennoskandii i Vostochnoi Antarktidi na izmeneniya klimata [The response of the lakes of East Fennoscandia and East Antarctica to climate change]. *DAN* [Dokl. Acad. Sci.]. 2012. Vol. 444, no. 5. P. 554–557. doi: 10.1134/S1028334X1206013X
- Filatov N. N., Zdorovenkov R. E., Terzhevik A. Yu., Khutter K. Nelineinye vnutrennie volny v krupnom oze-re [Nonlinear internal waves in a large lake]. *DAN* [Dokl. Acad. Sci.]. 2011. Vol. 441, no. 5. P. 1–4.
- Filatov N. N., Litvinenko A. V., Bogdanova M. S. Sovremennoe sostoyanie i dinamika vodnogo khozyaistva sub'ektov Rossiiskoi Federatsii na territorii basseina Belogo morya [The current state and dynamics of the water economy of the constituent entities of the Russian Federation on the territory of the White Sea basin]. *Arktika. Ekol. i ekonomika* [Arctic. Ecol. and Economy]. 2020b. No. 4(40). P. 19–33. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-19-33
- Filatov N. N., Litvinenko A. V., Bogdanova M. S., Karpechko V. A. Vodnye resursy Severnogo ekonomicheskogo raiona Rossii: sostoyanie i ispol'zovanie [Water resources of the Northern economic zone of Russia: current state and use]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2016b. Vol. 43, no. 5. P. 502–514.
- Filatov N. N., Tolstikov A. V., Bogdanova M. S., Litvinenko A. V., Menshutkin V. V. Sozdanie informatsionnoi sistemy i elektronnoy atlasa po ispol'zovaniyu resursov Belogo morya i ego vodosbora [Creation of an information system and an electronic atlas on the use of the resources of the White Sea and its catchment]. *Arktika. Ekol. i ekonomika* [Arctic. Ecol. and Economy]. 2014. No. 3(15). P. 18–29.
- Gatal'skaya E. V., Belkina N. A. Osobennosti nakopleniya fosfora v donnykh otlozheniyakh Ivan'kovskogo vodokhranilishcha [Features of phosphorus accumulation in bottom sediments of the Ivankovskoye reservoir]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]. 2020. Vol. 6(16), no. 4. P. 139–153. doi: 10.37279/2309-7663-2020-6-2-139-153
- Golosov S. D., Zverev I. S., Shipunova E. A. Modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov i ekosistem Ladozhskogo i Onezhskogo ozer na osnove 3D-modeli gidrodinamiki vnutrennego morya (MGVM) [Modeling of thermohydrodynamic processes and ecosystems of Lakes Ladoga and Onega based on a 3D model of the hydrodynamics of the inland sea (MGVM)]. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* [Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. P. 166–196.
- Isaev A. V., Savchuk O. P. Diagnoz sostoyaniya ekosistemy Ladozhskogo ozera i prognoz izmenenii pri vozmozhnom izmenenii klimata na osnove matematicheskogo modelirovaniya biogeokhimicheskikh potokov veshchestva [Diagnosis of the ecosystem state of Lake Ladoga and forecast of changes under possible climate change based on mathematical modeling of biogeochemical flows]. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* [Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. P. 197–208.
- Katalog ozer i rek Karelii [A catalogue of lakes and rivers of Karelia]. Eds. N. N. Filatov, A. V. Litvinenko. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. 289 p.
- Kalinkina N. M., Belkina N. A. Dinamika sostoyaniya bentosnykh soobshchestv i khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii Onezhskogo ozera v usloviyakh deistviya antropogennykh i prirodnnykh faktorov [Dynamics of benthic communities state and the sediment chemical composition in Lake Onega under the influence of anthropogenic and natural factors]. *Printsipy ekol.* [Principles of the Ecol.]. 2018. No. 2. P. 56–74. doi: 10.15393/j1.art.2018.7643
- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Izmeneniya gidrokhimicheskogo rezhima Onezhskogo ozera s nachala 1990-kh godov [Changes in the hydrochemical regime of Onego Lake since the early 1990s]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Proceed. RAS. Geogr. Ser.]. 2019. No. 1. P. 62–72. doi: 10.31857/S2587-55662019162-72
- Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Bala-ganskii A. F. Mnogoletnyaya dinamika stoka zheleza i fosfora v Onezhskoe ozero s vodami r. Shuya v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii [Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onego with the Shuya River under climate change conditions]. *Regional'naya ekol.* [Regional Ecol.]. 2018. No. 2(52). P. 7–15.
- Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaistvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoi zone Evropeiskogo Severa Rossii [Hydrological role of forestry and timber industry operations in the taiga zone of the European North of Russia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 225 p.
- Karpechko Yu. V., Nesterenko I. M. Vodnyi i teplovoy rezhim osushaemykh bolot i zabolochennykh zemel' Karelii [Water and thermal regime of drained bogs and wetlands of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1996. 118 p.
- Kaufman Z. S. Proiskhozhdenie bioty kontinental'nykh vodoemov [Origin of biota in continental water bodies]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. 258 p.
- Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and man-induced impact]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p.
- Litvinenko A. V., Filatov N. N., Bogdanova M. S. Vodokhozyaistvennaya situatsiya v Respublike Kareliya: sovremennoe sostoyanie i dinamika [Water management situation in the Republic of Karelia: current state and dynamics]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water Sector of Russia]. 2019. No. 2. P. 31–47.
- Lozovik P. A. Geokhimicheskaya klassifikatsiya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony na osnove ikh kislotno-osnovnogo ravnovesiya [Geochemical classification of surface waters in the humid zone based on their ac-

id-base balance]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2013. Vol. 40, no. 6. P. 583–592.

Lozovik P. A. Otsenka assimilatsionnoi sposobnosti k fosfornoi i organicheskoi nagruzkam i normirovanie dopustimogo antropogennogo vozdeistviya na vodnye ob'ekty po kineticheskoi i gidrogeokhimicheskoi modelyam [Assessment of assimilation ability to phosphorus and organic loads and standardization of permissible anthropogenic impact on water bodies according to kinetic and hydrogeochemical models]. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovr. sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and man-induced impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 88–95.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnykh vodakh [Processes of matter transformation, cycles and formation in natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 21–28.

Menshutkin V. V., Filatov N. N. Modelirovanie optimal'nogo upravleniya ekologo-sotsio-ekonomicheskoi sistemoi vodoem-vodosbor na primere Belomor'ya [Modeling the optimal management of the ecological-socio-economic system of water body-catchment by the example of the White Sea region]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2020. Vol. 47, no. 3. P. 506–515. doi: 31857/S0321059620030116

Menshutkin V. V., Filatov N. N. Modelirovanie ekologo-sotsio-ekonomicheskoi sistemy Belogo morya i ego vodosbora [Modeling the ecological-socio-economic system of the White Sea and its catchment area]. *MGI* [Marine Hydrophysical Inst.]. 2021. No. 1. P. 662–680. doi: 10.22449/0233-7584-2021-1-532-544

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Druzhinin P. V. Soystoyanie i prognozirovaniye sotsio-ekologo-ekonomicheskoi sistemy vodosbora Belogo morya s ispol'zovaniem kognitivnogo modelirovaniya [The current state and forecasting of the socio-ecological-economic system of the White Sea catchment with the use of cognitive simulation]. *Arktika. Ekol. i ekonomika* [Arctic. Ecol. and Economy]. 2018. No. 2(30). P. 79–85. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-4-17

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Potakhin M. S. Ekspertnaya sistema "Ozera Karelii". 1. Ordinarnye i nominal'nye priznaki ozer [Expert system *Lakes of Karelia*. 1. Ordinary and nominal features of lakes]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2009a. Vol. 36, no. 2. P. 160–171.

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Potakhin M. S. Ekspertnaya sistema "Ozera Karelii". 2. Klassifikatsiya ozer [Expert system *Lakes of Karelia*. 2. Classification of lakes]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2009b. Vol. 36, no. 3. P. 300–311.

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Potakhin M. S. Ekspertnaya sistema "Ozera Karelii" [Expert system *Lakes of Karelia*]. *Ozera Karelii. Spravochnik* [Lakes of Karelia. A reference book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

Nazarova L. E. Ob otsenke komfortnosti klimata Karelii [About assessment of comfortable climate of Karelia]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 129–133.

Nazarova L. E., Filatov N. N. O komfortnosti klimata Karelii [On the comfort of the climate in Karelia]. *Klimat Karelii: Izmenchivost' i vliyaniye na vodnye ob'ekty* [Climate of Karelia: Variability and impact on water bodies]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 193–204.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onego. An atlas]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 151 p.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. A reference book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC RAS. 461 p.

Rumyantsev V., Filatov N. N. Sostoyaniye Ladozhskogo i Onezhskogo ozer trebuyet prinyatiya srochnykh mer po sokhraneniuyu ikh resursov i vosstanovleniyu ekosistem [The state of Lakes Ladoga and Onego requires urgent measures to preserve their resources and restore ecosystems]. *Voda Magazine* [Water Magazine]. 2018. No. 10(134). P. 40–44.

Rukhovets L. A., Filatov N. N. Ozera i klimat: modeli i metody [Lakes and climate: models and methods]. *Modeli i metody v probleme vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery: ucheb. posobie* [Models and methods in the problem of interaction between the atmosphere and the hydrosphere: a tutorial]. Eds. V. P. Dymnikova, V. N. Lyksova, E. P. Gordova. Tomsk: TGU, 2014. P. 256–326.

Rukhovets L. A., Filatov N. N., Terzhevik A. Yu., Astrakhansev G. P., Minina T. R., Mal'gin A. N., Petrova N. A., Poloskov V. N., Belkina N. A., Efremova T. V., Nazarova L. E., Salo Yu. A., Sabylina A. V., Timakova T. M. Onezhskoe ozero segodnya i zavtra: opyt matematicheskogo modelirovaniya [Lake Onego today and tomorrow: the experience of mathematical modeling]. *Vodnye resursy Evropeiskogo Severa Rossii: itogi i perspektivy issled.* [Water resources of the European North of Russia: results and prospects of research]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 127–153.

Ryzhakov A. V. Krugovorot azotsoderzhashchikh veshchestv v prirodnykh vodakh [Cycle of nitrogen-containing substances in natural waters]. *Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. Eds. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. P. 86–88.

Sharov A. N., Tolstikov A. V. Gidrologicheskii i biologicheskii rezhimy ozer Vostochnoi Antarktidy [Hydrological and biological regimes of lakes in East Antarctica]. *Transformatsiya ekosistem* [Transformation of Ecosystems]. 2020. Vol. 3(3). P. 77–86. doi: 10.23859/estr-200318

Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Kravchenko I. Yu. Geokhimicheskie osobennosti funktsionirovaniya bioty v vodoemakh Karelii [Geochemical features of biota functioning in water bodies of Karelia]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Proceed. RAS. Geogr. Ser.]. 2018. No. 1. P. 90–100. doi: 10.7868/S2587556618010083

Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G., Zdorovenkov R. E., Zdorovenkova G. E., Volkov S. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R. Vozmozh-

noe vliyanie "neobychnoi" vesny na rezhim rastvorenogo kisloroda v melkovodnom ozere v letnii period [The possible effect of an unusual spring on the dissolved oxygen in a shallow lake during the summer]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 10. P. 17–27. doi: 10.17076/lim712

Tolstikov A. V., Chernov I. A. Izmenchivost' biogeokhimicheskikh protsessov v Belom more dlya raznykh klimaticheskikh uslovii po dannym modelirovaniya [Variability of biogeochemical processes in the White Sea under different climatic conditions: the modeling approach]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 6. P. 92–102. doi: 10.17076/eb950

Tolstikov A. V., Chernov I. A., Murzina S. A., Martynova D. M., Yakovlev N. G. Razrabotka kompleksa Green JASMINE dlya izucheniya i prognozirovaniya sostoyaniya ekosistem Belogo morya [Design and application of the Green JASMINE complex for the study and prediction of the ecosystems state and variability of the White Sea]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 5. P. 23–32. doi: 10.17076/eb501

Vodnye resursy i problema pit'evogo vodosnabzheniya. Opyt sotrudnichestva Karelii i Finlyandii [Water resources and the problem of drinking water supply. Experience of cooperation between Karelia and Finland]. Eds. N. Filatov, A. Litvinenko, A. Sarkioya, R. Portikivi, T. Reigerand. Petrozavodsk; Kuopio, 2006. 263 p.

Vyruchalkina T. Yu., Filatov N. N., Dianskii N. A., Gusev A. N. O prognoze mnogoletnikh izmenenii urovnya vody krupnykh ozer [On forecasting long-term variations of water level in large lakes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 3–16. doi: 10.17076/lim480

Yakovlev N. G. Vosproizvedenie krupnomasshtabnogo sostoyaniya vod i morskogo l'da Severnogo Ledovitogo okeana v 1948–2002 gg. Chast' 1: Chislennaya model' i srednee sostoyanie [Reproduction of the large-scale state of the waters and sea ice of the Arctic Ocean in 1948–2002. Part 1: Numerical model and mean state]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Proceed. RAS. Physics of the Atmosphere and Ocean]. 2009. Vol. 45, no. 3. P. 1–16.

Zdorovenova G. E., Gavrilenko G. G., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Zverev I. S., Zdorovenov R. E. Dinamika vod nebol'shogo ozera v period otkrytoi vody (po dannym izmerenii techenii i temperatury) [Dynamics of waters of a small lake during the period of open water (according to measurements of currents and temperature)]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]. 2018. Vol. 4(14), iss. 3. P. 54–68.

Zobkov M. B. Metody obrabotki geoinformatsionnykh dannykh sostoyaniya vodnykh ob'ektov [Methods for processing geoinformation data of the state of water bodies]: PhD (Cand. of Tekh.) thesis. Petrozavodsk, 2012. 178 p.

Bogdanov S., Zdorovenova G., Volkov S., Zdorovenov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions. *Inland Wa-*

ters. 2019. Vol. 9, iss. 2: Life under Ice in Lake Onego (Russia) – An Interdisciplinary Winter Limnology Study. P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Yakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study. *J. Mar. Syst.* 2018. Vol. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006

Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: available data and numerical models. *Geosci.* 2020. Vol. 10. Art. 463. doi: 10.3390/geosciences10110463

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A.* 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O., Pettersen L., Bobilev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. London: Springer-Praxis, 2005. 472 p.

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in-situ data. *Inland Waters*. 2019. Vol. 9(2). P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Filatov N., Terzhevik A., Zdorovenov R., Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K. Strongly nonlinear Internal waves in lakes: Generation, Transformation. *Field Studies of Non-Linear Internal Waves in Lakes on the Globe*. Ch. 2. Springer, 2012. P. 25–106.

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

Ladoga and Onego – Great European lakes. Observations and modeling. Eds. L. Rukhovets, N. Filatov. Springer, 2010. 302 p.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V. Transformation and cycle of labile substances and production-destruction processes in lake ecosystems. *J. Siberian Fed. Univ. Biol.* 2017. Vol. 10(4). P. 404–421.

Mironov D., Heise E., Ritter B., Kourzeneva E., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.

Savchuk O. P. Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Front. Mar. Sci.* 2018. doi: 10.3389/fmars.2018.00095

Strakhovenko V., Subetto D., Ovdina E., Belkina N., Efremenko N. Distribution of elements in iron-manganese formations in bottom sediments of Lake Onego (NW Russia) and small lakes (Shotozero and Surgubskoe) of adjacent territories. *Minerals*. 2020. No. 10(5). Art. 440.

Wüest A., Pasche N., Ibelings B. W., Sharma S., Filatov N. Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study. *Inland Waters*. Vol. 9, no. 2. 128 p. doi: 10.1080/20442041.2019.1634450

Received March 19, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник, советник председателя
КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

Белкина Наталья Александровна

ведущий научный сотрудник, руководитель группы
исследований донных отложений, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bel110863@mail.ru

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии
и гидрогеологии, к. г. -м. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru

Зобков Михаил Борисович

руководитель лаб. гидрохимии и гидрогеологии,
старший научный сотрудник, к. т. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: duet@onego.ru

Калинкина Наталия Михайловна

руководитель лаб. гидробиологии, д. б. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: cerioda@mail.ru

Назарова Лариса Евгеньевна

директор, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru

Belkina, Natalya

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bel110863@mail.ru

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru

Zobkov, Mikhail

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: duet@onego.ru

Kalinkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: cerioda@mail.ru

Nazarova, Larisa

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

Litvinenko, Alexandr

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

Регеранд Татьяна Ивановна

ученый секретарь ИВПС, к. б. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: regerand@nwpi.krc.karelia.ru

Рыжаков Александр Вадимович

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru

Теканова Елена Валентиновна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: etekanova@mail.ru

Толстиков Алексей Владимирович

руководитель лаб. географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru

Regerand, Tat'yana

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

Ryzhakov, Alexander

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

Tekanova, Elena

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: etekanova@mail.ru

Tolstikov, Aleksey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.013

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ВОДОСБОР – ВОДОТОК – ВОДОЕМ»

С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, С. Д. Голосов, И. С. Зверев

Институт озераведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Россия

Цель исследования: создание системы моделей, описывающих процессы тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем» и обеспечивающих выполнение вычислительного эксперимента по оценке возможного воздействия на состояние водных объектов хозяйственной деятельности и изменений климата. Методы: компоновка модели водной системы с использованием разработанных и отлаженных моделей процессов выполняется в соответствии со следующими определяющими факторами: 1) требованиями поставленной задачи; 2) особенностями строения объекта исследования; 3) наличием и размещением пунктов измерительной сети, являющихся источником исходной информации для моделирования; 4) возможностями потребителя при реализации модели. Результаты: в состав разработанной системы моделей входят семь детерминированных моделей и одна стохастическая. К числу детерминированных относятся модель формирования стока на водосборе *ILHM*, модель выноса химических веществ с водосбора *ILLM*, модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D), 1D-модель теплового режима и перемешивания водоема *FLake*, 1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме *FLakeEco*, 2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме, 3D-модель тепло- и массопереноса в водоеме. Стохастической компонентой системы является модель погоды *SWM*, представляющая собой стохастический генератор метеозаписей с заданными характеристиками.

Ключевые слова: система моделей; водосбор; водоток; водоем; антропогенное воздействие; климатические факторы.

S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova, S. D. Golosov, I. S. Zverev.
MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE “CATCHMENT – WATERCOURSE – RESERVOIR” SYSTEM

Objective: Development of a system of models describing the processes of heat and mass transfer in the “catchment – watercourse – reservoir” system and enabling the assessment of the impact of economic activity and climate change on the state of bodies of water. Methods: A water system model is configured using the newly developed and working models of processes in accordance with the determining factors: 1) the requirements

of the task; 2) structural features of the research object; 3) the presence and locations of the observation network points as a source of input information for modeling. Results: The resultant system of models includes seven deterministic and one stochastic models. The deterministic models are the model of water runoff from the catchment *ILHM*, model of chemicals removal from the catchment *ILLM*, model of water flow, sediment transport and dissolved impurities in an open channel (1D, 2D, 3D), 1D model of reservoir's thermal regime and mixing *FLake*, 1D model of non-conservative impurity dynamics in reservoir *FLakeEco*, 2D model of currents and sediment transport in a shallow reservoir, 3D model of heat and mass transfer in reservoir. The stochastic component of the system is the *SWM* weather model, which is a stochastic generator of meteorological elements.

Key words: model system; catchment; watercourse; reservoir; anthropogenic impact; climatic factors.

Необходимым условием создания информационно-управляющей системы охраны и рационального использования ресурсов водных объектов является наличие инструментов (математических моделей), позволяющих количественно оценивать процессы, происходящие в реках, водоемах и на их водосборах, а также прогнозировать последствия воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях, выходящих за рамки возможного натурного изучения. В настоящей работе представлены результаты развития основ математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем», а также примеры практической реализации разработанных моделей, обеспечивающих выполнение вычислительного эксперимента по оценке возможного воздействия хозяйственной деятельности и изменений климата на состояние водных объектов.

Опыт предшествующих исследований [Румянцев и др., 1985] показывает, что для успешного решения разнообразных задач, связанных с моделированием процессов на водосборах, водотоках и водоемах, специалист должен иметь в своем распоряжении систему моделей, которые описывают сток и вынос взвешенных и растворенных веществ с водосбора, их перенос и трансформацию в гидрографической сети и в водоеме, принимающем сток. В данном случае уместно говорить о модельной системе, объединяющей модели перечисленных выше процессов, которые могут работать как в комплексе, так и самостоятельно. Построение модели сложной системы с использованием разработанных и отлаженных компонентов выполняется в соответствии со следующими определяющими факторами: 1) требованиями поставленной задачи; 2) особенностями строения объекта исследования; 3) наличием и размещением пунктов измерительной сети, явля-

ющихся источником исходной информации для моделирования; 4) возможностями потребителя при реализации модели [Румянцев и др., 1985]. Существенно расширить возможности моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем» удастся за счет привлечения детерминированно-стохастического (ДС) подхода, основанного на применении как детерминированных, так и стохастических компонентов в рамках единой системы моделей.

На сегодняшний день разработана и успешно используется ДС система моделей, ориентированная на количественную оценку процессов, происходящих в водных объектах и на их водосборах, а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений (рис. 1).

Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. Их краткое описание представлено ниже.

Модель формирования стока на водосборе *ILHM* предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей площади [Becker, Pfitzner, 1987; Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019].

Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект *ILLM* предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной



Рис. 1. Структура системы моделей для оценки процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем»

Fig. 1. The structure of the system of models for assessing the processes of heat and mass transfer in the “catchment – watercourse – reservoir” system

точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Разработана с ориентацией на решение задач по оценке выполнения рекомендаций HELCOM по снижению нагрузки на Балтийское море [Guidelines..., 2005]. Модель позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью [Behrendt, Dannowski, 2005; Кондратьев и др., 2011; Кондратьев, Шмакова, 2019; Kondratyev et al., 2020].

Математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D) предназначена для расчетов характеристик двухфазного неустановившегося движения в русле реки. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы». Модель позволяет проследить перемещение взвешенного и растворенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока [Шмакова, 2013; Кондратьев, Шмакова, 2019].

1D-модель теплового режима и перемешивания водоема FLake разработана сов-

местными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD). Предназначена для решения задач, связанных с расчетами термического режима в системе «снег – лед – вода – донные отложения» и условий перемешивания в период открытой воды. Модель служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в естественных и искусственных водоемах [Golosov et al., 2006, 2007; Kirillin et al., 2011].

1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме FLakeEco способна описывать годовой цикл кислородного режима, сезонную динамику концентрации биогенных элементов, первичную продукцию фитопланктона, а также сезонную динамику общей биомассы фитопланктона, основана на параметрическом описании вертикального распределения концентрации растворенного кислорода в водной массе озера. Модель идейно и структурно является продолжением модели FLake, которая в данном случае выступает в роли гидротермодинамического блока [Terzhevskiy et al., 2007].

2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме позволяет рассчи-

тивать не только пространственную структуру течений и траектории распространения примеси на акватории при различном ветровом воздействии и стоке с водосбора, но и вычислять изменения морфометрических характеристик ложа водоема. Модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [Кондратьев, Шмакова, 2019].

3D-модель тепло- и массопереноса в водоеме основана на модели гидродинамики внутреннего моря, разработанной в Институте вычислительной математики РАН, дополненной биотическим блоком и адаптированной к озерным условиям. Модель позволяет исследовать термический и ледовый режимы крупных озерных систем в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий и при возможных климатических изменениях. Модель является средством выполнения оценок изменений термогидродинамики озер, распространения вод притоков в акваториях, первичного продуцирования и внутренней нагрузки [Зверев и др., 2017; Motovilov et al., 2020].

Стохастическая модель погоды SWM является блоком генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных детерминированных моделей, входящих в моделирующую систему. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы детерминированно-стохастического моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора и их транспорта в водоеме [Шмакова, Кондратьев, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2019].

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной системы моделей при решении задач расчета траекторий распространения загрязненных вод притоков, поступающих в русло Невы перед городскими водозаборами, оценки эффективности проектов восстановления озера Неро, а также для расчета внешней биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро и выявления механизмов его загрязнения и эвтрофирования.

3D-модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле используется для оценки и прогноза распространения в русле р. Невы загрязняющих веществ, поступающих со стоком притоков. Река Ижора – один из наиболее загрязненных притоков Невы, расположенный выше водозаборов Санкт-Петербурга. На водосборе Ижоры

находится одно из старейших промышленных предприятий России – Ижорские заводы, а также производственные фирмы «ТехноБалт», «Бахус», «Илком», «Энергобумпром», «Петролес», бумажная фабрика «Коммунар» и многие другие промышленные предприятия. В нижнем течении река принимает сток с полигона обезвреживания и захоронения токсичных отходов «Красный Бор», в могильниках которого находится около 2 млн тонн токсичных отходов I–V классов опасности. О возможной утечке с территории полигона, приводящей к загрязнению окружающей среды – расположенных вблизи полигона полей, рек и ручьев, а также атмосферы, стало известно еще в середине 90-х годов прошлого века. В настоящее время вода реки непригодна для купания, питья и рыбной ловли.

Перед проведением работ по моделированию проведен натурный эксперимент с целью выявления механизма распространения стоков Ижоры в русло Невы [Кондратьев и др., 2020]. В качестве индикатора распространения вод была использована общая минерализация (TDS) – интегральная характеристика водной массы, позволяющая достоверно различать воды Невы и воды притоков. TDS характеризует суммарное содержание всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ и определяет ее удельную электропроводность. Натурный эксперимент был проведен 14 июля 2019 г. в условиях средней водности реки Невы (расход воды 2500 м³/с). Измерения выполнялись *in situ* в 45 фиксированных точках, расположенных на акватории р. Ижоры, в том числе в ее устье, и в русле Невы. Измерения TDS проводились с использованием многоканального портативного анализатора Milwaukee (MW 802 pH/EC/TDSMeter), Eh – ОВП-метра San-XinORP-504. На рис. 2 (а) представлена схема распределения этих характеристик в исследуемом участке акватории.

На основе анализа результатов проведенного натурного эксперимента удалось показать, что воды одного из наиболее загрязненных притоков после поступления в русло Невы прижимаются основным течением реки к берегу и распространяются вдоль него в направлении течения. Влияние поперечной турбулентной диффузии на перемешивание водных масс крайне незначительно.

Расчеты переноса примеси в Неве с использованием разработанной модели выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды (2500 м³/с). Концентрация растворенной консервативной примеси при впадении Ижоры в Неву принималась равной 1, что позволяет провести последующий пересчет результатов

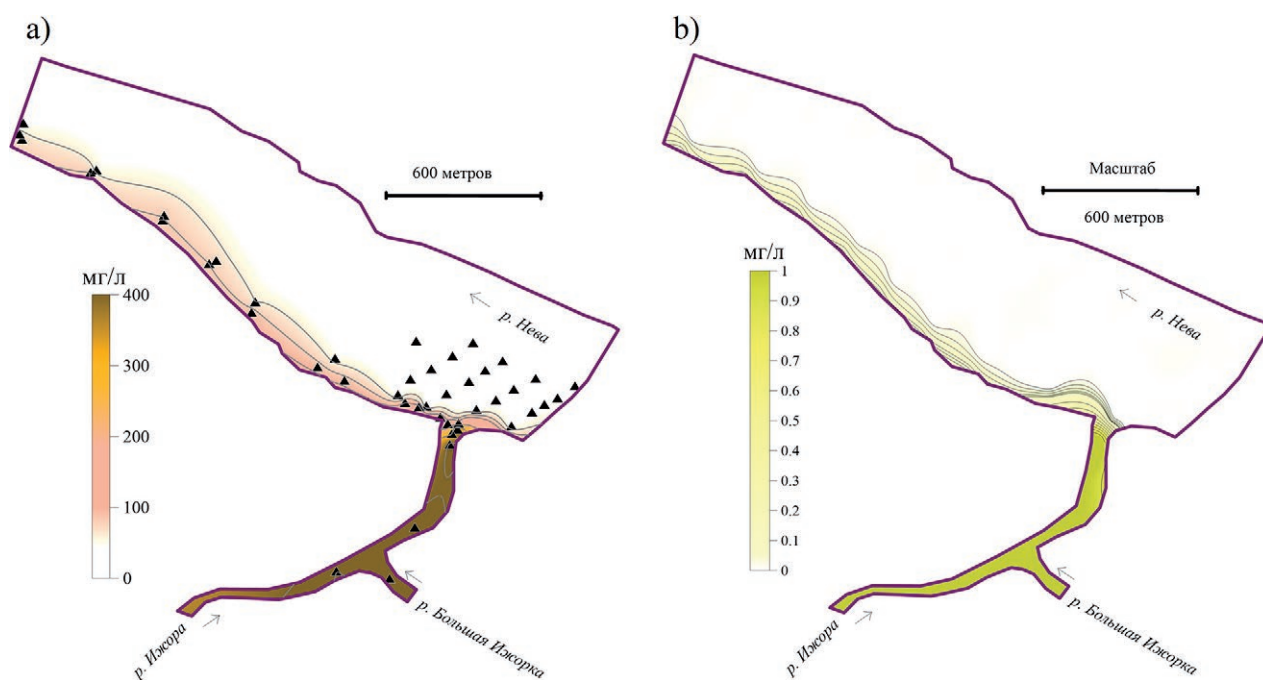


Рис. 2. Результаты натурного эксперимента по оценке общей минерализации в зоне смешения вод рек Ижоры и Невы 14.07.2019, ▲ – точки измерений (a); результаты расчета распространения примеси, поступившей в Неву со стоком Ижоры (b)

Fig. 2. Results of a field experiment to assess the total mineralization in the mixing zone of waters of the Izhora and Neva rivers on July 14, 2019, ▲ – measurement points (a); results of calculating the propagation of substances that entered the Neva with the Izhora runoff (b)

моделирования на любое конкретное значение концентрации. Фоновое значение концентрации примеси в Неве принималось равным нулю. Результаты расчетов, подтверждающие адекватность модели, представлены на рис. 2 (b) [Кондратьев и др., 2020].

В результате на настоящем этапе исследования показано, что через 4–5 часов после поступления примеси в основное русло Невы у ближайшего водозабора будет иметь место примерно семикратное разбавление вод Ижоры. Попадание растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. В результате расчетов распространения твердых частиц-адсорбентов установлено, что поступившие со стоком притока наносы не достигнут первого по пути следования оголовка водозабора и осядут приблизительно в 0,5 км от устья Ижоры. Более детальная оценка попадания растворенной примеси в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» может быть сделана после уточнения их расположения по ширине русла и глубине.

Озеро Неро – крупнейшее озеро Ярославского Поволжья. Средняя глубина озера составляет 1,5 м, площадь зеркала 54,5 км². Неро является зарегулированным водоемом, единст-

венный сток из озера – р. Векса, перегородженная плотиной. Основной приток – р. Сара, впадающая в озеро с юга. На берегу озера расположен город Ростов Великий. В настоящее время устьевые участки рек, питающих озеро водой, заилены, замедлен озерный водообмен, ухудшены органолептические свойства и качественные характеристики водных масс, интенсивно идет процесс антропогенного эвтрофирования [Бикбулатов и др., 2003]. Для улучшения экологической ситуации в озере предложен комплекс мероприятий, включающий углубление участка акватории в пределах городской черты г. Ростова на 0,5 м (рис. 3, а). Оценка целесообразности выполнения указанных работ проводилась с использованием 2D-модели течений и транспорта наносов в мелководном водоеме, адаптированной к условиям оз. Неро. Расчеты выполнялись для периода средней водности, что соответствует расходу воды реки Сара 3,7 м³/с. Как показали результаты моделирования, для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшатся в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений), что негативно скажется на водообмене. Увеличение глубины и уменьшение скорости течения при сохранении переносимого количества водных масс и наносов, поступающих со стоком

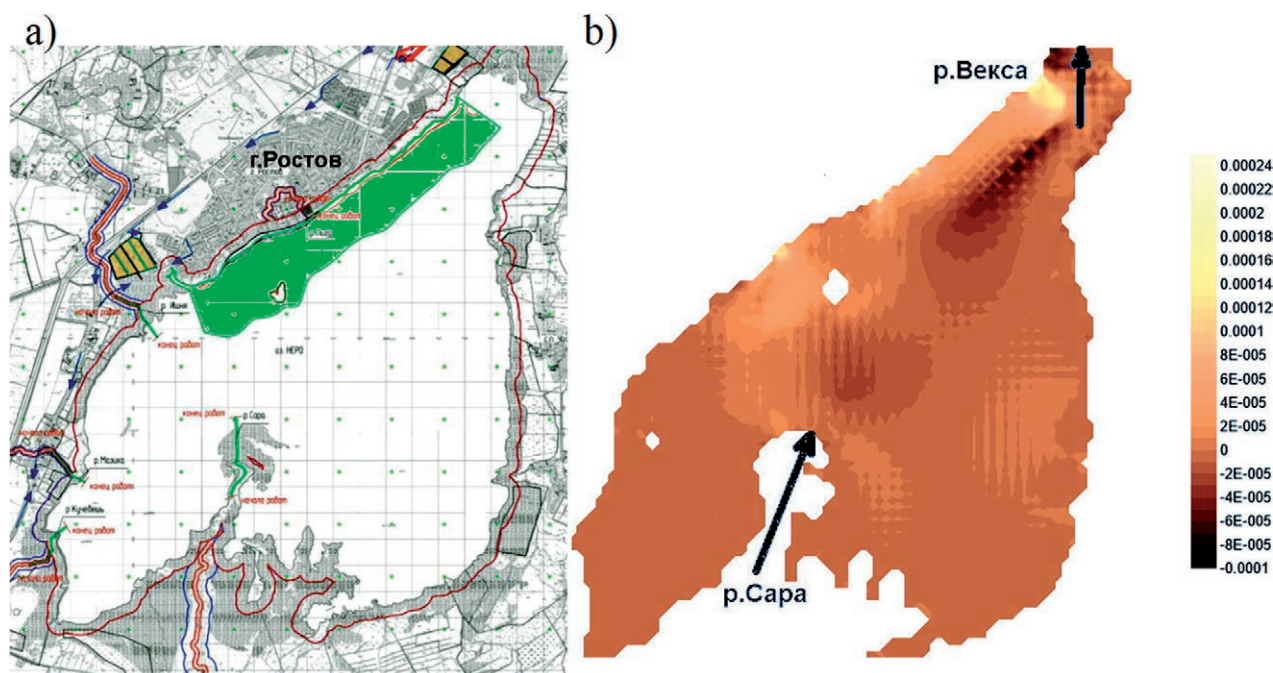


Рис. 3. Схема оз. Неро с обозначенным участком дноуглубительных работ (выделено зеленым цветом) (a); распределение по акватории разности значений расхода наносов при естественном режиме и расхода наносов, полученного в результате численного эксперимента, кг/с (b)

Fig. 3. Lake Nero with a designated dredging area (highlighted in green) (a); distribution over the water area of the difference between the values of sediment discharge under natural conditions and sediment discharge obtained as a result of a numerical experiment, kg/s (b)

притоков, приведет к снижению интенсивности переноса частиц наносов и заилению углубленной области. На рис. 3 (b) приведено распределение по акватории разности расходов наносов (расход наносов при естественном режиме за вычетом расхода наносов, полученного при численном эксперименте), иллюстрирующее снижение значений расхода наносов в области углубления. На основании изложенного сделан вывод о нецелесообразности реализации указанного проекта восстановления озера ввиду его сомнительной эффективности.

Чудско-Псковское озеро – четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией [Nutrient..., 1999; Lake..., 2001; Кондратьев и др., 2010]. Площадь озера составляет 3555 км², водосбора – 44 000 км². Российская часть водосбора Чудско-Псковского озера включает территорию Псковской области, затрагивая Сланцевский, Лужский и Кингисеппский районы Ленинградской области. Основной приток озера – река Великая, водосбор которой занимает около 59 % всей площади водосбора. Наиболее крупный приток с эстонской стороны – река Эмайыги с водосбором, составляющим 22 % общей площади. Озеро иг-

рает существенную роль в экономике Эстонии и Северо-Запада России, поэтому рациональное использование его биоресурсов и сохранение условий для их воспроизводства является приоритетной задачей обеих стран. Современные требования водной рамочной директивы ЕС (Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза № 2000/60/ЕС от 23 октября 2000 г.) указывают на необходимость разработки более детальной совместной российско-эстонской программы рационального использования и охраны водных ресурсов Чудско-Псковского озера. Кроме того, Чудско-Псковское озеро и его водосборный бассейн – один из источников формирования нагрузки на Финский залив Балтийского моря, уровень которой регламентируется Планом действий по Балтийскому морю [HELCOM..., 2007, 2013].

В настоящее время особое беспокойство вызывает процесс эвтрофирования водоема, сопровождающийся «цветением» воды и ухудшением ее качества. Важнейшим фактором, определяющим интенсивность эвтрофирования Чудско-Псковского озера, является обеспеченность водной массы биогенными элементами, прежде всего фосфором. При решении задачи детерминированно-стохастической

(ДС) оценки стока и выноса биогенных элементов с российской части водосбора Чудско-Псковского озера использовалась система моделей *SWM-ILHM-ILLM*. Моделирование проводилось по следующим основным этапам:

1. Оценка параметров стохастической модели погоды для наблюдаемых рядов метеорологических элементов в изучаемом регионе (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков, факт выпадения осадков) по данным наблюдений на метеостанции Псков.
2. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины (100 лет) с параметрами распределения, соответствующими современным климатическим условиям.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных слоев стока с водосбора реки Великой по детерминированной модели формирования стока *ILHM*.
5. Построение кривой распределения значений слоя стока с изучаемого водосбора в современных климатических условиях на основе рассчитанного ряда. Оценка параметров распределения слоя стока (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).
6. Пересчет среднемесячных значений слоя стока в среднегодовые значения.
7. Моделирование среднегодового выноса биогенных веществ с российской части водосбора Чудско-Псковского озера (с учетом составляющих) по детерминированной модели формирования нагрузки *ILLM*.
8. Построение кривой распределения значений выноса биогенных веществ с изучаемо-

го водосбора на основе смоделированного ряда. Оценка параметров распределения среднегодового выноса биогенных веществ с водосбора (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

Итогом ДС-моделирования в данном случае является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков, среднемесячных слоев стока и среднегодового выноса биогенных веществ с российской части водосбора Чудско-Псковского озера в условиях современного климата. Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в таблице. Здесь приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 тР/год, 8549 тN/год) и ее природной составляющей (269 тР/год, 3573 тN/год) на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора. Представлены также их средние квадратичные отклонения, а также значения, рассчитанные для многоводных (обеспеченностью 1 и 5 %) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99 %) лет. Нетрудно видеть, что изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники биогенной нагрузки напрямую зависят от водности года.

Выполнен расчет по оценке перспектив снижения фосфорной нагрузки за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство на российской части водосбора Чудско-Псковского

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока H , рассредоточенной (LP_{distr} и LN_{distr}) и природной (LP_{nat} и LN_{nat}) составляющих биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора

Distribution parameters of the calculated annual runoff H , dispersed (LP_{distr} and LN_{distr}) and natural (LP_{nat} and LN_{nat}) components of nutrient load on Lake Peipsi from the Russian part of the catchment

	$X_{50\%}$	σ	$X_1\%$	$X_5\%$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
H , мм/год (mm/year)	242,41	57,02	375	336	281	204	148	110
LP_{distr} , т/год (t/year)	400	81,52	590	535	455	345	265	210
LP_{nat} , т/год (t/year)	269	50,67	387	353	303	235	185	151
LN_{distr} , т/год (t/year)	8549	2013	13239	11870	9898	7200	5228	3859
LN_{nat} , т/год (t/year)	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

Примечание. Среднее – $X_{50\%}$, среднее квадратичное отклонение – σ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % – $X_{\%}$.

Note. Mean – $X_{50\%}$, mean square deviation – σ , values of probability 1, 5, 25, 75, 95 and 99 % – $X_{\%}$.

озера. Нагрузка, сформированная на полях сельскохозяйственных предприятий, оценивалась по методу, предложенному специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства [Брюханов, 2016]. Расчеты выполнялись исходя из содержания общего фосфора в пахотном слое почвы, доз внесения минеральных и органических удобрений на поля сельхозпредприятия и их усвоения сельхозкультурами, а также происхождения и механического состава почв. Учитывались современные практикуемые в Псковской области технологии содержания животных и системы удаления навоза. Результатом расчета явилась прогностическая оценка снижения фосфорной нагрузки на 10,7 т/год за счет внедрения НДТ.

С использованием модели *FLake* выполнены расчеты с целью получения прогностической оценки возможных изменений температурного и кислородного режимов озер Псковского и Чудского в условиях изменяющихся климатических и антропогенных воздействий на период по конец 2100 г. [Кондратьев и др., 2010].

Основой для оценки изменения регионального климата служил сценарий A2 (модель ECHAM5_MPI-OM). Из результатов расчета следует, что температура воды в Чудском озере будет иметь тенденцию к возрастанию, которое составит 2,2 °C для поверхности и всего лишь 0,5 °C для придонной области. В Псковском озере температура поверхности и в придонной области вырастет одинаково – на 2,2 °C. Различный рост придонной температуры в изучаемых озерах объясняется тем, что Псковское озеро ввиду меньшей глубины практически всегда является перемешанным от поверхности до дна, что приводит к более эффективному прогреву придонной области. Продолжительность ледостава на Чудском озере уменьшится практически вдвое – с 150–160 до 80–85 дней (рис. 4, а). Также будет уменьшаться и толщина ледового покрова с 40 см в начале XXI века до 20 см в его конце. В Псковском озере продолжительность ледостава уменьшится с 160 до 100 дней, а толщина льда – с 60–70 до 20–30 см.

В Чудском озере ожидаются отрицательные тренды в динамике концентрации растворен-

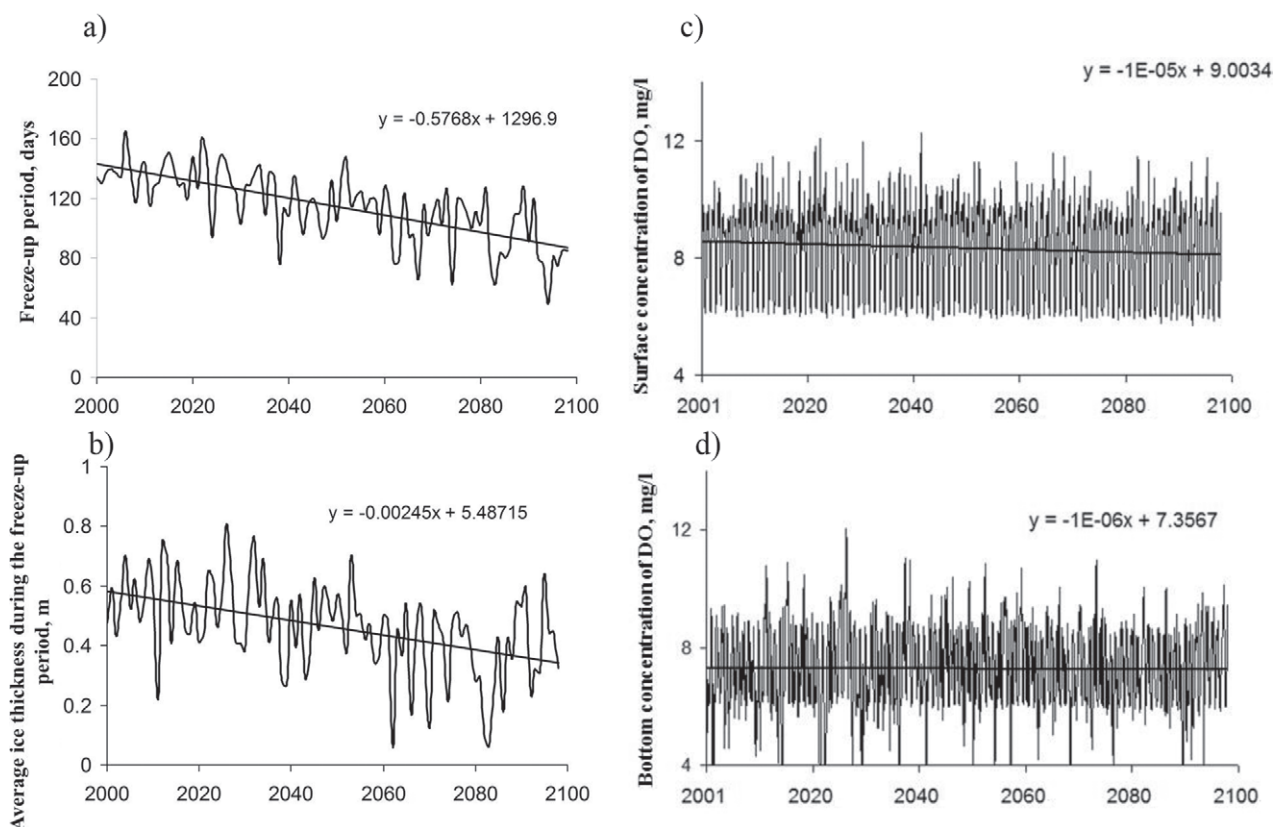


Рис. 4. Продолжительность периода ледостава (а), динамика толщины ледового покрова (б), динамика концентрации РК на поверхности (с) и у дна (д) в Чудском озере в XXI веке в соответствии со сценарием изменения климата A2

Fig. 4. The duration of the freeze-up period (a), the dynamics of the ice cover thickness (b), the dynamics of DO surface concentration (c), and bottom concentration (d) in Lake Peipsi-Chudskoye in the XXI century according to A2 scenario

ного кислорода (РК) как в поверхностных слоях, так и у дна (рис. 4, b). Скорее всего, такое развитие событий будет вызвано уменьшением поступления РК из атмосферы вследствие снижения растворимости газа при повышении температуры воды. В Псковском озере отрицательный тренд будет наблюдаться только в поверхностных слоях. В придонном слое можно ожидать слабовыраженный положительный

тренд концентрации РК, вызванный изменениями в условиях перемешивания озера и аэрации придонной области.

Как следует из результатов 3D-моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 5, a). В подледный период течения в обоих озерах в основном носят бароклинный

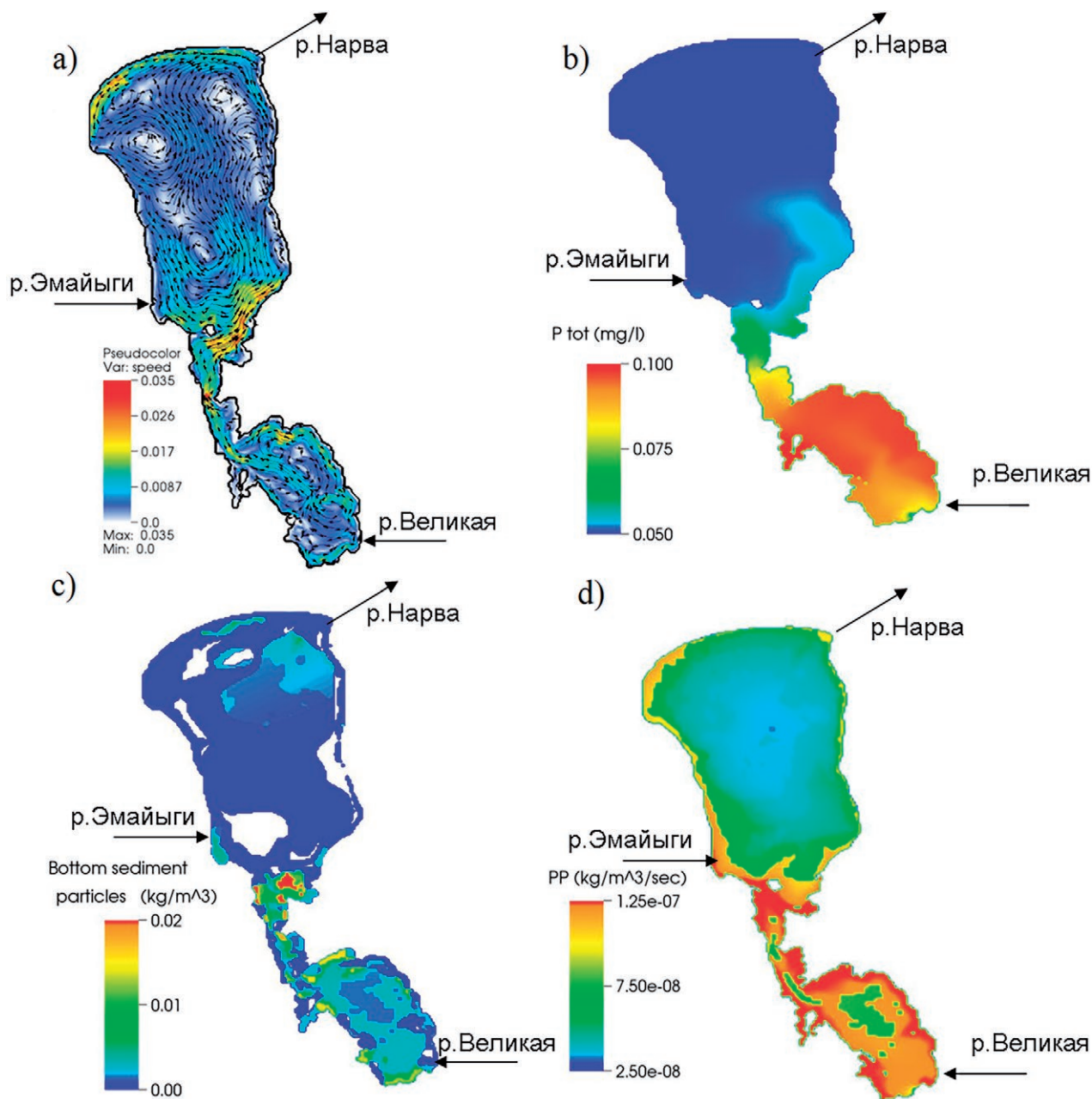


Рис. 5. Результаты 3D-моделирования: а – поле скоростей течений в середине апреля (м/с); б – пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля; в – пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля; г – пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля

Fig. 5. Results of 3D modeling: а – field of current velocities in mid-April (m/s); б – spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; в – spatial distribution of the concentration of bottom sediment particles in mid-July; г – spatial distribution of the primary production of phytoplankton in mid-July

характер, обусловленный неравномерным распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики – в основном до 1,5–2 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле–мае основным влияющим на течения фактором становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Скорости при этом возрастают до 5–6 см/с. Характер течений и их скорости остаются таковыми в течение всего периода открытой воды до начала ледостава, когда основным фактором, определяющим циркуляцию водных масс, снова становится бароклинность, вызванная неравномерным по пространству теплообменом между водной массой и донными отложениями.

Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами – циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис. 5, b). Эти процессы прослеживаются в течение всего года. Первый процесс проявляется в том, что более холодная, а следовательно, более плотная вода Чудского озера блокирует водообмен с Псковским озером с севера. Кроме того, концентрация фосфора в Чудском озере меньше, чем в Псковском, поэтому в зоне смешения двух водных масс на границе озер наблюдается уменьшение концентрации фосфора в водной массе Псковского озера. Второй процесс проявляется в том, что концентрация фосфора в воде р. Великой также меньше, чем в центральной части Псковского озера. Поэтому в течение всего года в юго-восточной части Псковского озера наблюдаются минимальные в озере концентрации фосфора. В таких условиях максимальные концентрации фосфора в Псковском озере сосредоточены в центральной и особенно в западной части акватории. Пространственное распределение фосфора в Чудском озере носит выраженный зональный характер. Максимальные значения наблюдаются в южной части озера в зоне смешения с водной массой Псковского озера, минимальные – в северной. Иногда при смене ветровой ситуации происходит проникновение водной массы Псковского озера в восточные и центральные районы Чудского озера. В этих случаях в Чудском озере возникают локальные максимумы концентрации фосфора в соответствующих районах акватории. Пространственное распределение общего азота не имеет таких особенностей. Оно носит зональный характер в течение всего года. Концентрация увеличивается от истока р. Великой в северном направлении.

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Это объясняется тем, что в отсутствие волнения напряжение трения в придонной области, создаваемое бароклинными течениями, не достигает критического значения, необходимого для отрыва частиц донных отложений от поверхности. В период открытой воды процесс ресуспензии верхнего слоя донных отложений протекает активно, обеспечивая поступление биогенных веществ во всех формах в придонную область, откуда они переносятся в водную массу посредством турбулентных вихрей и течений. Взмучивание начинает активно развиваться в мае в Псковском озере, тогда как водная масса Чудского озера в это время еще устойчиво стратифицирована после схода ледового покрова. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 5, c). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. С установлением в первой половине ноября ледового покрова взмучивание донных осадков в Псковском озере прекращается. В Чудском озере ресуспензия также протекает до начала периода ледостава.

Процессы первичного продуцирования (ПП) в Чудско-Псковском озере так же, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Лимитирование ПП обусловлено недостатком фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), которая полностью либо отражается, либо поглощается снежно-ледовым покровом в зимний период. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток ФАР на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает активно развиваться фитопланктон. В Чудском озере процессы ПП протекают с гораздо меньшей интенсивностью, а на севере озера интенсивность фотосинтеза близка к нулю. В летние месяцы свой вклад в интенсификацию ПП вносит прогрев водных масс обоих озер. Фотосинтез водорослей возрастает практически на порядок величины по сравнению с весенним периодом (рис. 5, d). Характер пространственного распределения ПП меняется. К максимальным значениям фотосинтеза в Псковском озере добавляются зоны с фотосинтезом такой же интенсивности в прибрежных районах Чудского озера. До конца лета характер пространственного распределения ПП не меняется. В осенний период в связи с естественным уменьшением прихода ФАР интенсивность фотосинтеза закономерно

снижается и практически сводится к нулевым значениям к началу периода ледостава.

Для оценки влияния изменений внешней нагрузки на экологическое состояние озера выполнены численные эксперименты по возможному снижению содержания биогенных элементов в стоке основного притока озера р. Великой. Как следует из результатов расчетов, снижение концентрации общих форм фосфора и азота в стоке р. Великой на 10 % по сравнению с современными значениями способно привести к снижению суммарной (внутренней + внешней) нагрузки на Чудско-Псковское озеро на 1,5 % для фосфорной и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднесуточным значениям. Снижение внешней биогенной нагрузки является безальтернативным способом улучшения экологического состояния озера, однако быстрого деэвтрофирования ожидать не стоит, поскольку восстановление соответствия трофического уровня донных отложений трофическому уровню водной массы происходит со значительным запаздыванием.

Таким образом, представленные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что к настоящему времени разработана и успешно используется на практике система моделей тепло- и массопереноса в водоемах, водотоках и на их водосборах, которая является инструментом для принятия управленческих решений в области охраны и рационального использования ресурсов водных объектов в ситуациях, когда натурные исследования затруднены или невозможны. Перспективы развития научных работ в области совершенствования созданной системы моделей заключаются прежде всего в расширении спектра детерминированных моделей и совершенствовании детерминированно-стохастических методов моделирования процессов стока, выноса взвешенных частиц и растворенных примесей с водосбора и в русловом потоке, а также тепло- и массопереноса на акватории водоема. Прогресс исследований зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований с целью уточнения параметров моделей. Перспективы практического расширения области внедрения разработанной системы связаны с созданием автоматизированных информационно-управляющих систем охраны и рационального использования ресурсов водных объектов с применением ГИС-технологий, а также средств обработки и анализа аэрокосмической информации об акваториях и подстилающей поверхности водосборов.

Работа выполнена за счет средств темы № 0154-2019-0001 Плана НИР ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН.

Литература

Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М., Литвинов А. С., Поддубный С. А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 192 с.

Брюханов А. Ю. Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2016. 39 с.

Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // Озера Евразии: проблемы и пути решения: Матер. I Междунар. конф. (Петрозаводск, 11–15 сент. 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 228–233.

Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.

Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Рябченко В. А., Дворников А. Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.

Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В. Метод оценки выноса биогенных веществ с водосборов и биогенной нагрузки на водные объекты Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Лема, 2011. 20 с.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Игнатьева Н. В., Иванова Е. В., Гузиватый В. В. Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 83–92.

Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Капотова Н. И., Ливанова Н. А. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 93 с.

Шмакова М. В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.

Шмакова М. В., Кондратьев С. А. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 74–84.

Becker A., Pfitzner B. EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling // Acta Hydrophys. 1987. Vol. 31, no. 3–4. P. 125–141.

Behrendt H., Dannowski R. (eds.) Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scena-

rio calculations on possible changes. Berlin, Germany: Weissensee Verlag, 2005. 353 p.

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes // *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling // Proceed. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters, June 26–28 2006, University of Granada, Spain. P. 209–215.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM, Helsinki, 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea. Copenhagen, Denmark, 2013. 19 p.

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software*. 2011. Vol. 26, iss. 5. P. 683–685.

Kondratyev S. A., Ignatyeva N. V., Shmakova M. V., Ershova A. A., Minakova E. A., Terekhov A. V. Model-

based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types // Mirschel W., Terleev V., Wenkel K. (eds). *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. Springer, 2020. P. 299–310.

Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. T Nõges. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.

Motovilov Y. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S., Zverev I. S., Puklakov V. V., Fashchevskaya T. B. Information – modeling complex for assessing the hydroenvironmental conditions of reservoirs // *Water Resources*. 2020. Vol. 47. P. 751–762. doi: 10.1134/S0097807820050139

Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999 / Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999. 66 p.

Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovennov R., Zdorovennova G. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes // Proceed. 11th Symp. Physical Processes in Natural. Warnemunde, Germany, 3–6 September, 2007. P. 147–156.

Поступила в редакцию 17.02.2021

References

Bikbulatov E. S., Bikbulatova E. M., Litvinov A. S., Poddubnyi S. A. *Gidrologiya i gidrokhimiya ozera Nero* [Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero]. Rybinsk: Rybinsk Printing House, 2003. 192 p.

Brukhanov A. Yu. *Metody proektirovaniya i kriterii otsenki tekhnologii utilizatsii navoza, pometa, obespechivayushchie ekologicheskuyu bezopasnost'* [Design methods and criteria for assessing technologies for the utilization of manure, droppings, ensuring environmental safety]: Summary of DSc (Dr. of Tech.) thesis. St. Petersburg, 2016. 39 p.

Kondratyev S. A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya* [Formation of external load on water bodies: modeling problems]. St. Petersburg: Nauka, 2007. 253 p.

Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Ryabchenko V. A., Dvornikov A. Yu. *Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor-vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera)* [Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Peipsi-Pskov)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 116 p.

Kondratyev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V. *Metod otsenki vynosa biogennykh veshchestv s vodosborov i biogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty Severo-Zapadnogo regiona Rossiiskoi Federatsii* [A method for assessing the removal of nutrients from watersheds and nutrient load on water bodies of the North – Western region of the Russian Federation]. St. Petersburg: Lema, 2011. 20 p.

Kondratyev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor – vodotok – vodoem* [Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – water body system]. St. Petersburg: Nestor-History, 2019. 246 p.

Kondratyev S. A., Shmakova M. V., Ignat'eva N. V., Ivanova E. V., Guzivaty V. V. *Eksperimental'nye i model'nye issledovaniya rasprostraneniya vod reki Izhory v rusle reki Nevy* [Experimental and model studies of the Izhora River waters spreading in the Neva River]. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 83–92.

Rumyantsev V. A., Kondratyev S. A., Kapotova N. I., Livanova N. A. *Opyt razrabotki i primeneniya matematicheskikh modelei basseinov malyykh rek* [Experience in the development and application of mathematical models for small river basins]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985. 93 p.

Shmakova M. V. *Teoriya i praktika matematicheskogo modelirovaniya rechnykh potokov* [Theory and practice of mathematical modeling of river flows]. St. Petersburg: Lema, 2013. 142 p.

Shmakova M. V., Kondratyev S. A. *Stokhasticheskaya model' pogody v sisteme determinirovanno-stokhasticheskogo modelirovaniya stoka i biogennoi nagruzki* [Stochastic weather model in the system of deterministic-stochastic modeling of runoff and biogenic load]. *Meteorology and Hydrology*. 2014. No. 9. P. 74–84.

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. *Otsenka vliyaniya osnovnykh pritokov Ladozhskogo ozera na formirovanie vodnoi massy bukhty Petrokrepost' (istok r. Nevy) po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya* [Assessment of the influence of the main tributaries of Lake Ladoga on the formation of the water mass of the Petrokrepost Bay (the source of the Neva River) based on the results of mathematical modeling]. *Ozera Evrazii: probl. i puti resheniya*: Mater. I mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 11–15 sent. 2017 g.) [Lakes of Eurasia: Probl. and solu-

tions: Proceed. 1st int. conf. (Petrozavodsk, Sept. 11–15, 2017)]. Petrozavodsk, 2017. P. 228–233.

Becker A., Pftzner B. EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. *Acta Hydrophys.* 1987. Vol. 31, no. 3–4. P. 125–141.

Behrendt H., Dannowski R. (eds.) Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Weissensee Verlag, Berlin, Germany, 2005. 353 p.

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. *Proceed. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters*, June 26–28 2006, University of Granada, Spain. P. 209–215.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM, Helsinki, 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – *Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea*. Copenhagen, Denmark, 2013. 19 p.

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. Flake-Global: Online lake

model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011. Vol. 26, iss. 5. P. 683–685.

Kondratyev S. A., Ignatyeva N. V., Shmakova M. V., Ershova A. A., Minakova E. A., Terekhov A. V. Model-based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types. *Mirschel W., Terleev V., Wenkel K. (eds). Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. Springer, 2020. P. 299–310.

Lake Peipsi. *Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry*. Ed. T. Nöges. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.

Motovilov Y. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S., Zverev I. S., Puklakov V. V., Fashchevskaya T. B. Information-modeling complex for assessing the hydroenvironmental conditions of reservoirs. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. P. 751–762. doi: 10.1134/S0097807820050139

Nutrient loads to Lake Peipsi. *Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999*. Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999. 66 p.

Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovenov R., Zdorovenova G. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes. *Proceed. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters*. Warnemünde, Germany, 3–6 September, 2007. P. 147–156.

Received February 17, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кондратьев Сергей Алексеевич

заместитель директора по научной работе, д. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: kondratyev@limno.org.ru
тел.: +79213718470

Шмакова Марина Валентиновна

старший научный сотрудник, д. г. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: m-shmakova@yandex.ru
тел.: (812) 3870260

Голосов Сергей Дмитриевич

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: iliazverev@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kondratyev, Sergey

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: kondratyev@limno.org.ru
tel.: +79213718470

Shmakova, Marina

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: m-shmakova@yandex.ru
tel.: (812) 3870260

Golosov, Sergey

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Zverev, Ilya

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: iliazverev@mail.ru

УДК 628.1.034 + 628.113.1

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВОДНЫХ МАСС НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ЗОНАХ ВЫСОКОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

**А. П. Лепихин¹, Е. В. Веницианов², Т. П. Любимова³,
А. А. Тиунов¹, Я. Н. Паршакова³, Ю. С. Ляхин¹,
А. В. Богомоллов¹**

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

² Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Устойчивость систем водоснабжения является одним из основных факторов, определяющих надежность функционирования крупных промышленных комплексов. Эта проблема рассматривается на примере филиала «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Березники, осуществляющего забор свежей технической воды из р. Камы (Камского водохранилища). Характерной особенностью этого водного объекта является значительная изменчивость его гидрологического режима. В период летней межени он характеризуется низкими скоростями течений. В зимний период при снижении уровня воды в водохранилище наблюдается типичный речной режим. Кроме того, происходит сильное техногенное воздействие на водный объект. Нагрузка формируется в значительной мере за счет недекларируемых рассредоточенных (диффузных) источников. Их характерной особенностью является высокая минерализация (а соответственно, плотность формируемых стоков) и поведение принципиально отличается от процессов разбавления и миграции стоков с нейтральной плавучестью. Для их описания нельзя использовать традиционные методы расчета процессов разбавления. Происходит формирование двухслойного течения, когда содержание основных ионов в поверхностном горизонте значительно меньше, чем в придонном слое. В начале июля 2020 г. на водозаборе филиала «Азот» наблюдалось существенное увеличение содержания ионов хлора и натрия, обусловивших остановку предприятия. Встал вопрос об установлении причин наблюдаемого явления. Возможными причинами могли быть аварийные сбросы из шламохранилища «Белое море» концентрированных отходов на берегу или загрязнение сточными водами, поступающими в Каму ниже водозабора, за счет возвратных течений. Моделирование этих ситуаций удастся реализовать с учетом вертикальной неоднородности водных масс на основе сопряженного использования гидродинамических моделей в одно-, двух- и трехмерной (1D–2D–3D) постановке. В результате показано, что единственной причиной аварийной ситуации мог явиться забор воды из придонного течения р. Камы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водохранилища; устойчивость водоснабжения; плотностная стратификация; моделирование.

**A. P. Lepikhin, E. V. Venitsianov, T. P. Lyubimova, A. A. Tiunov,
Ya. N. Parshakova, Yu. S. Lyakhin, A. V. Bogomolov. EFFECTS OF THE
VERTICAL HETEROGENEITY OF WATER MASSES ON THE STABILITY OF
INDUSTRIAL WATER SUPPLY IN INDUSTRY-INTENSIVE AREAS**

The stability of water supply systems is one of the main factors for reliable operation of large industrial complexes. This problem is considered through the case of the Azot branch of JSC URALCHEM in the city of Berezniki, which derives raw process water from the Kama River (Kama storage reservoir). A characteristic feature of this water body is a highly variable hydrological regime. During the summer low water period, it is characterized by low current velocities. In winter, when the water level in the reservoir declines, a typical river flow regime is observed. In addition, the water body is exposed to heavy human impact. The bulk of the load comes from non-declared non-point (diffuse) sources. Their characteristic feature is high suspended solids content, and, accordingly, the density of the effluents. Their behavior is fundamentally different from the processes of dilution and migration of effluents with neutral buoyancy. Traditional methods of calculating dilution processes cannot be used to describe them. A two-layer flow is formed, where the content of basic ions in the surface horizon is more than an order of magnitude lower than near the bottom. Early in July 2020, a significant increase in the content of chlorine and sodium ions was observed at the water intake facility of the Azot branch, causing a shutdown of the plant. The causes of the phenomenon had to be identified. The putative causes were emergency discharges of concentrated waste from the sludge dump on the shore or contamination by the wastewater entering the Kama River below the intake facility due to backflow. These situations can be modeled taking into account the vertical heterogeneity of water masses based on the coupling of hydrodynamic models in one-, two-, and three-dimensional formulation. As a result, it was shown that the only cause of the emergency could be water intake from the Kama River bottom flow.

Key words: storage reservoirs; water supply stability; density stratification; modeling.

Введение

Проблема, актуализировавшая выполнение представленной работы, связана с увеличением содержания хлоридов 7–8 июля 2020 г. в воде реки, откуда осуществляет забор воды для производственных нужд филиал «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Березники. Концентрация хлоридов возросла до 850 мг/л. Так как технологические процессы на предприятии весьма чувствительны к содержанию хлоридов, произошла внеплановая остановка производства. Это резкое повышение содержания хлоридов было однократным и локальным. Оно не привело к негативным последствиям в Камском водохранилище, в том числе к гибели рыбы и растительности. Общая обзорная схема рассматриваемого района представлена на рис. 1.

Проведенное Западно-Уральским межрегиональным управлением Росприроднадзора обследование определило перечень местных предприятий, в результате деятельности которых образуются сточные воды. Предстояло выявить наиболее вероятную причину резкого увеличения содержания хлоридов в речной воде из названных возможных:

- поступление из устья притока р. Камы – реки Толыч,
- сброс сточных вод в р. Каму (Камское водохранилище) от станции ООО «Сток» за счет обратных течений от Камской ГЭС, а также ветрового дрейфа.

Характерной особенностью гидрохимического режима этого участка р. Камы (Камского водохранилища) является сильное техногенное воздействие в пределах Соликамско-Березниковского промузла, причем техногенная нагрузка формируется в доминирующей степени не за счет точечных, декларируемых источников загрязнения, а вследствие разгрузки недекларируемых рассредоточенных, называемых в литературе диффузными [Диффузное..., 2020]. Это сток с поверхности водосбора, промышленных площадок, грунтовых вод, протечек из шламохранилищ и пр. Характерной особенностью этих источников является высокая минерализация и, соответственно, плотность поступающих от них стоков.

Гидрохимический режим р. Камы в районе г. Березники

Характерной специфической особенностью рассматриваемого участка Камского водохра-

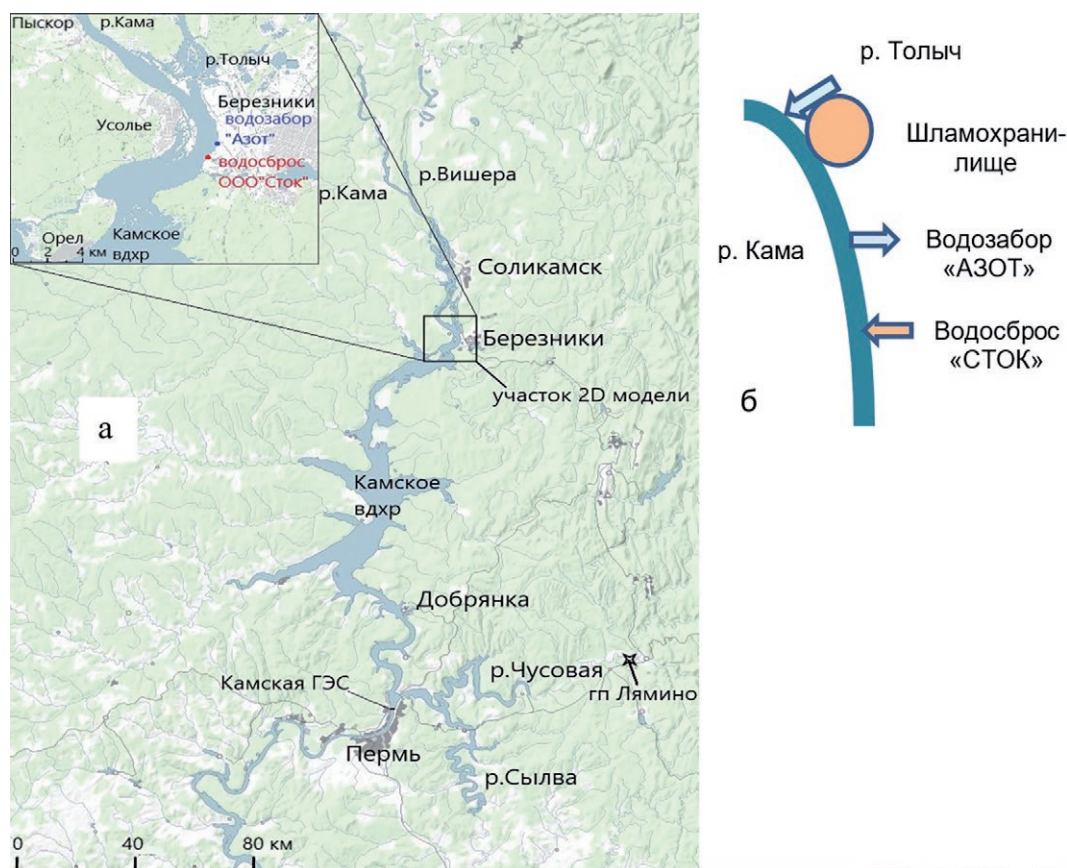


Рис. 1. Обзорная карта рассматриваемого участка Камского водохранилища (а); схема водопользования на участке р. Камы (б)

Fig. 1. Overview map of the Kama reservoir section under consideration (a); water use scheme for the Kama River section (b)

нилища в районе г. Березники является формирование в период летней межени в придонной области значительного слоя воды толщиной ~ 3–5 м с повышенной минерализацией.

Характерной особенностью р. Камы (Камского водохранилища) в районе Соликамско-Березниковского промузла являются фильтрационные разгрузки высокоминерализованных рассолов с минерализацией, превышающей 100 г/л. «Тяжелые» рассолы из-за подавления вертикальных турбулентных пульсаций могут накапливаться в районе фильтрационных разгрузок в донном слое реки.

Впервые это явление для Камы было описано еще в 1959 г. Г. И. Куликовым [1959]. Граница раздела водных масс с различной минерализацией четко выражена. В поверхностном слое минерализация воды составляет 0,3–0,5 г/л, а в придонной области до 15 г/л.

Эти данные подтверждены полевыми исследованиями в июле 2020 г. Измерялась удельная электропроводность воды, имеющая устойчивую связь с минерализацией воды [Возняк

и др., 2019]. На рис. 2 представлены графики изменения удельной электропроводности воды на разных вертикалях, расположенных в 50–100 м от левого берега Камского водохранилища, от автодорожного моста Березники-Усолье до водосброса станции перекачки ООО «Сток» (далее по тексту – водосброс ООО «Сток»).

Аналогичные данные получены при полевых исследованиях в августе 2018 г. [Lepikhin et al., 2020]. Граница перехода находилась на глубине 8–10 м, как и в 2020 г.

Устойчивость границы раздела этих водных масс с различной минерализацией определяется числом Ричардсона Ri , которое характеризует отношение гравитационных сил (плавучести) к конвекции вследствие различия плотностей:

$$Ri = (g/\rho) \partial \rho / \partial z / (\partial u / \partial z)^2,$$

где g – гравитация; ρ – плотность, зависящая от глубины z ; u – характерная скорость потока. Критическое значение $Ri \sim 0,67$. Когда оно ве-

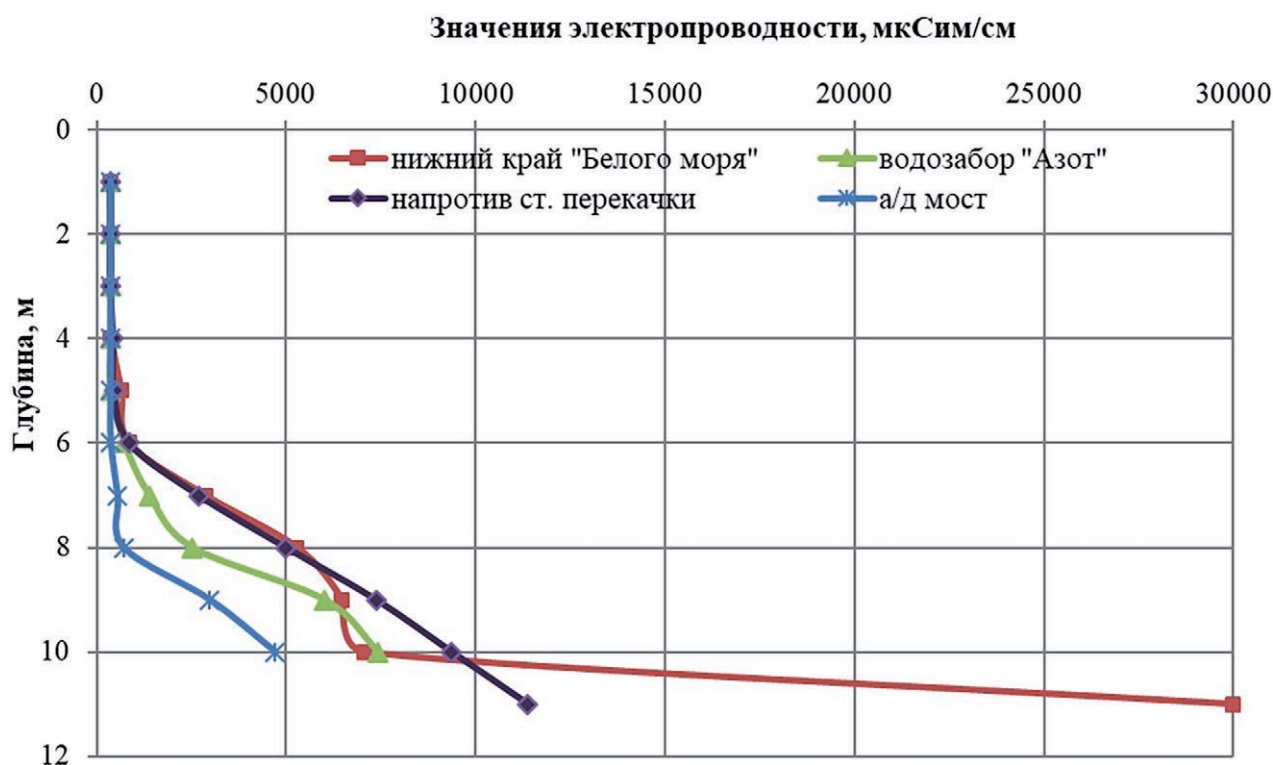


Рис. 2. Распределение удельной электропроводности по глубине вдоль левого берега р. Камы на отдельных вертикалях по результатам полевых исследований 14.07.2020

Fig. 2. Distribution of specific electrical conductivity in depth along the left bank of the Kama River on separate verticals according to the results of the field studies 14.07.2020

лико, турбулентное перемешивание в стратификации обычно подавляется. Для описанного течения $Ri \gg 1$ [см. Возняк и др., 2019; Lepikhin et al., 2020], что показывает устойчивость раздела слоев в р. Каме при данных условиях.

Анализ влияния Камской ГЭС

Характерной особенностью зафиксированного 7–8 июля 2020 г. нарушения устойчивости подачи воды требуемого качества является его относительная кратковременность ~ 2,5 суток.

На плотине Камской ГЭС в данный период наблюдались значительные колебания расхода воды, как и в любой другой период, в связи с требованием выработки электроэнергии.

Расход сброса в этот период изменялся от 300 до 3050 м³/сек (рис. 3). Эта неравномерность сброса воды через плотину ГЭС может вызвать формирование обратных течений из-за эффектов инерционности. В Камском водохранилище наблюдаются обратные течения, обусловленные особенностями работы Камской ГЭС. Их анализ дается в [Лепихин и др., 2020; Lyubimova et al., 2020a].

Обратные течения в водохранилище могут иметь также дрейфовую природу, обусловлен-

ную наличием достаточно интенсивного ветра одного направления. Для рассматриваемой задачи выноса «загрязнений» от водосброса ООО «Сток» к водозабору «Азота» наибольший интерес представляют ветры южного направления. Характерную скорость дрейфового течения можно оценить по соотношению Экмана [Богословский, 1980; Филатов, 1983].

Расчет дрейфовых течений на основе гидродинамических моделей в 2D-постановке, с использованием данных метеостанции г. Березники в период с 05.07 по 08.07.2020 г., показывает, что обратные течения не могут быть причиной наблюдаемой нештатной ситуации на рассматриваемом водозаборе.

Оценка влияния плотностной стратификации на процессы разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов может быть выполнена на численной модели в рамках 3D-подхода. Расчетная область длиной 4500 м включала в себя участок реки Камы, где расположены все предполагаемые источники поступления сильно минерализованных вод: устье р. Толыч – притока Камы, а также участок левого берега до створа сброса ООО «Сток» и русло реки на этом участке.

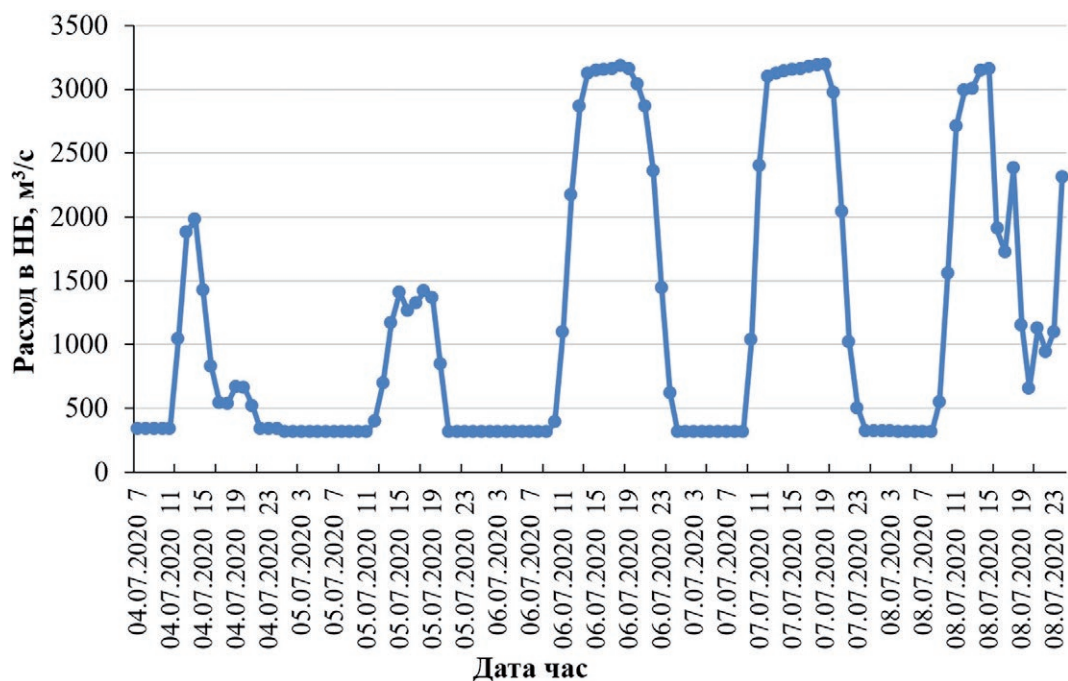


Рис. 3. Почасовая динамика расходов сбросов воды в нижний бьеф Камской ГЭС

Fig. 3. Hourly dynamics of water discharge costs in the lower reaches of the Kama HPP

Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода с использованием стандартной $k - \epsilon$ модели турбулентности (k – турбулентная кинетическая энергия, ϵ – скорости ее диссипации) в 3D-постановке. Обоснованность использования этой модели представлена в работах [Возняк и др., 2019; Лепихин и др., 2020; Lepikhin et al., 2020].

На нижней границе расчетной области, имитирующей речное дно, ставились условия прилипания и отсутствия потока примеси (хлоридов). Верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, считалась недеформируемой; на ней ставились условия отсутствия нормальной компоненты скорости и касательных напряжений, а также условие отсутствия потока примеси. На боковых границах расчетной области выполнялись условия равенства нулю производной скорости по нормали и отсутствия потока примеси.

На входе расчетной области задавались постоянные по всему сечению скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту вдоль потока реки, и концентрация, равная фоновой концентрации примеси в реке. Трехмерное численное моделирование проводилось с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent, основанного на реализации метода конечных объемов. Строилась неравномерная сетка при помощи пакета Gambit 2.4.6, входящего в вычислительный пакет

ANSYS Fluent, в соответствии с фактической морфометрией рассматриваемого участка. Учитывая значительные размеры расчетной области и крайнюю ограниченность гидрометрической сети, для построения гидродинамических моделей использовался комбинированный подход, основанный на сочетании и сопряжении гидродинамических моделей в 1D–2D–3D-постановке.

Для построения гидродинамической модели в одномерном приближении для Камского водохранилища от слияния рек Кама и Вишера до плотины Камской ГЭС протяженностью 265 км выбран специализированный гидрологический программный пакет HEC-RAS v. 5.0.7, разработанный Гидрологическим инженерным центром (HEC, США) [HEC-RAS..., 2016], который позволяет проводить гидродинамические расчеты для оценки обратных волн в водохранилище от пусков с ГЭС.

Для построения модели Камского водохранилища в одномерной постановке было построено 617 поперечных сечений по всей длине водохранилища (р. Камы) и основных притоков – рек Сылва и Чусовая – с шагом в 500 м. В качестве сценарного расчета для одномерной модели был проведен расчет с изменением расхода сброса от времени на Камской ГЭС в период с 3 по 8 июля 2020 года. Использовались почасовые расходы воды в нижний бьеф Камской ГЭС (рис. 3) и суточные уровни

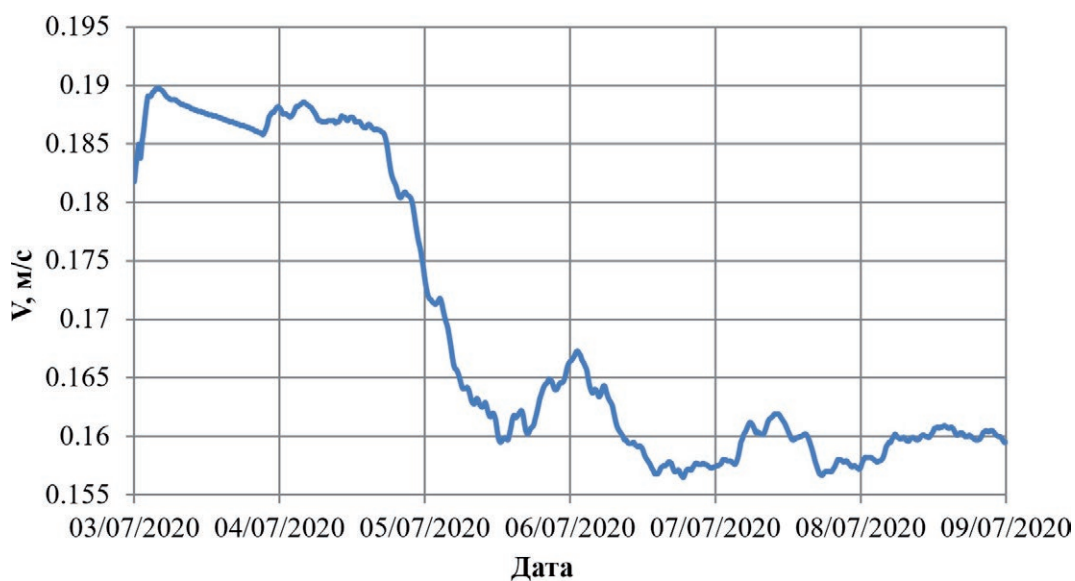


Рис. 4. Изменение скорости течения в р. Каме в районе г. Березники с 3 по 8 июля 2020 года по результатам расчета на одномерной модели

Fig. 4. Change in the flow velocity in the Kama River near Berezniki from 3 to 8 July, 2020 based on the results of the calculation on a one-dimensional model

воды в верхнем бьефе Камской ГЭС, а также суточные расходы воды в р. Чусовая (по г. п. пгт Лямино) и в р. Сытва (по г. п. с. Сытвенск).

Проведенным расчетом с натурными данными расходов и уровней воды получены графики изменения расхода воды, уровня воды и скорости течения в р. Каме в районе г. Березники. Как следует из полученных результатов, колебательные изменения расходов сброса в нижний бьеф Камской ГЭС в течение дня также приводят к колебаниям скоростей течения в районе г. Березники (рис. 4). Однако эти колебания скоростей течения не приводят к возникновению обратных течений на этом участке реки Камы и, следовательно, не могут быть причиной поступления загрязняющих веществ с нижележащих участков водохранилища в расположенные выше (рис. 4).

Моделирование в 2D- и 3D-постановке распространения загрязняющих веществ на участке р. Камы в районе г. Березники при гидрологических условиях 3–8 июля 2020 года

При создании гидродинамической модели в двумерной постановке на расчетной области построена прямоугольно-треугольная сетка, состоящая из 25743 элементов со средней длиной ребра элемента 50 метров. Размеры моделируемого объекта: длина 24 км, ширина от 400 до 5000 м.

Двумерная (в горизонтальной плоскости) модель для участка р. Камы от с. Пыскор до пос. Орёл протяженностью 24 км сделана с использованием специализированного гидрологического пакета SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC, разработанного по заказу и при участии Центра гидравлических исследований США. В ее основе лежат несколько модулей (RMA2, RMA4, ADH, FESWMS, TUFLOW и другие), которые позволяют решать различные задачи. Нами использованы модули RMA2, применявшийся для моделирования двумерного течения, и модуль RMA4, который использовался для моделирования распространения загрязнения.

На этом участке реки Камы была построена цифровая модель рельефа дна (ЦМР). Расчет основных гидродинамических характеристик и расчет распространения загрязнения потока проводится в два этапа. На первом этапе в модуле RMA2 выполняется расчет гидродинамических характеристик, в первую очередь распределения глубин и распределенных по вертикали скоростей потока. На втором этапе в модуле RMA4 с использованием рассчитанного на первом этапе распределения скоростей производился расчет распространения загрязнения.

Для проведения расчета распространения загрязняющих веществ выбраны два источника загрязнения на данном участке р. Камы:

- поступление ЗВ через устьевой залив р. Толыч, г. Березники, моделирующий диффуз-

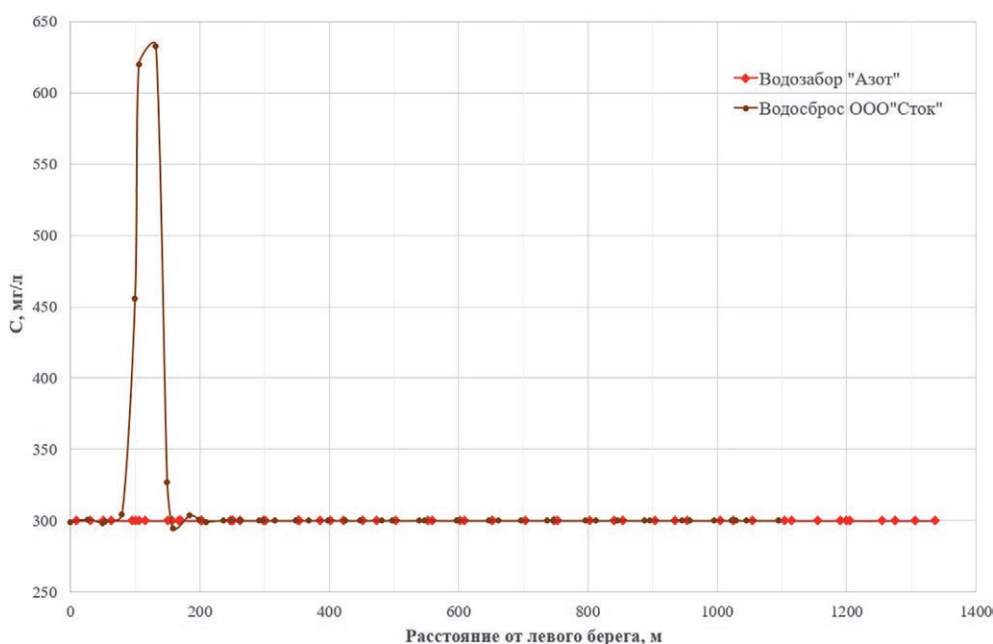


Рис. 5. График расчетной концентрации хлоридов в районе водозабора «Азот» и водосброса ООО «Сток» при их поступлении через водосброс ООО «Сток» в расчетное время 5 дней 14 часов, что соответствует дате 08.07.2020 и времени 14.00

Fig. 5. The schedule of the calculated concentration of chlorides in the area of the water intake 'Azot' and in the area of the spillway of LLC 'Stok' when they enter through the spillway of LLC 'Stok' at the estimated time of 5 days 14 hours, which corresponds to the date 08.07.2020 and the time 14.00

ное загрязнение от шламохранилища «Белое море»;

- поступление ЗВ через водосброс ООО «Сток», г. Березники, благодаря возвратному течению.

Для расчета использованы следующие расходы и концентрации загрязняющих веществ:

- на всем участке моделирования р. Камы за фоновое значение принята концентрация 300 мг/л;
- при поступлении ЗВ через устьевой залив р. Толыч принят постоянный расход поступающих ЗВ 1,61 м³/с концентрацией 100 г/л, что соответствует интенсивности поступления ЗВ 161 кг/с (модель фильтрационного загрязнения);
- при поступлении ЗВ через водосброс ООО «Сток» рассмотрен вариант реальной работы с расходом сброса 19000 м³/час (или 5,28 м³/с). Сброс осуществляется по 2 часа каждый день, для определенности принято время работы с 12 до 14 часов дня, с концентрацией – 10 г/л.

Проведенные вычислительные эксперименты (рис. 5) показали, что изменения уровней воды в результате неравномерности работы Камской ГЭС, а также наблюдаемые в этот период ветры южного направления недостаточны

для формирования нештатной ситуации продолжительностью 2,5 суток вследствие «заброса» загрязненных сточных вод от расположенной ниже по течению станции перекачки ООО «Сток». Соответственно, обратные течения не могут рассматриваться как фактор формирования наблюдаемой нештатной ситуации.

Для залива р. Толыч как источника загрязнения р. Камы в верхней части г. Березники в районе рассматриваемого водозабора ОАО «Азот» возможно повышение минерализации воды до 0,8 г/л (рис. 6). Однако эти данные требуют корректировки, так как получены в рамках 2D-модели, которая не учитывает наличие двухслойного течения в р. Каме.

Задача в 3D-постановке решалась с помощью пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent с использованием $k - \varepsilon$ модели, описывающей турбулентные пульсации в рамках нестационарного изотермического подхода. Ранее этот пакет успешно применялся для описания течения высокоминерализованных рассолов в поверхностных водных объектах [Лепихин и др., 2012; Lyubimova et al., 2020b]. В качестве возможного источника загрязнения р. Камы (Камского водохранилища) рассматривался залив р. Толыч. При этом фоновая минерализация воды в р. Каме принималась равномерной

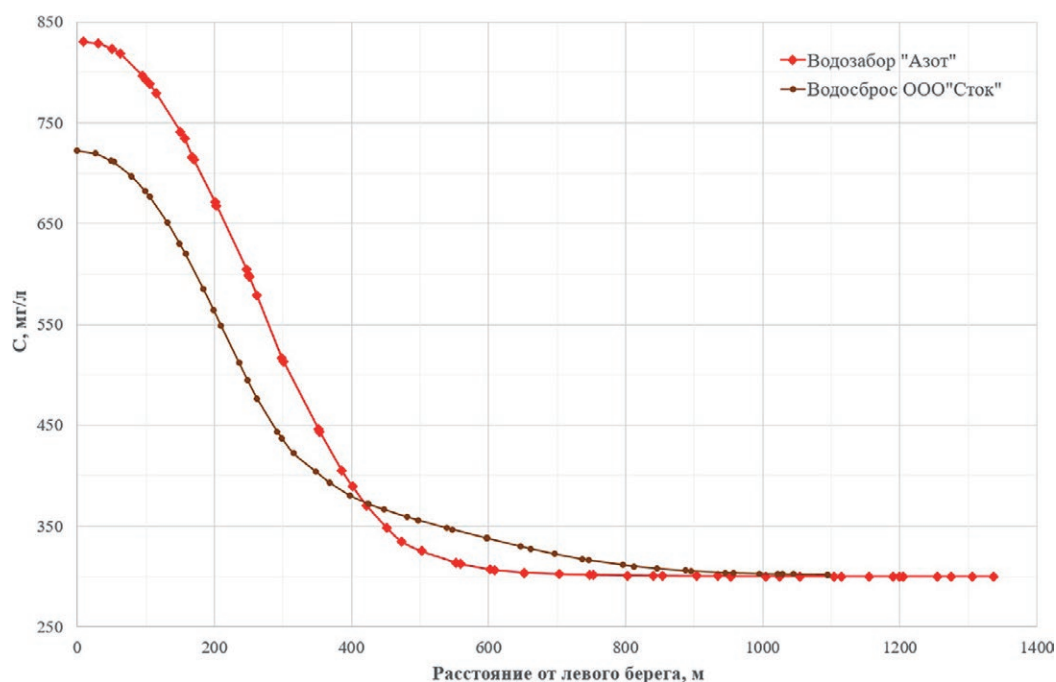


Рис. 6. Профили концентрации хлоридов в районе водозабора «Азот» и водосброса ООО «Сток» при их поступлении через залив р. Толыч в расчетное время 5 дней 14 часов, что соответствует дате 08.07.2020 и времени 14.00

Fig. 6. Profiles of the chlorides concentration in the area of the water intake 'Azot' and in the area of the spillway of LLC 'Stok' when they enter through the bay of the Tolych River at the estimated time of 5 days 14 hours, which corresponds to the date 08.07.2020 and the time 14.00

по всему сечению потока и равной 0,2 г/л. Минерализация воды по всему заливу р. Толыч принималась одинаковой и равной 100 г/л.

Скорости во входных сечениях на р. Каме и при слиянии в заливе реки Толыч и реки Камы задавались в виде профилей скорости, полученных в двумерных расчетах.

На рис. 7 показаны распределения минерализации по глубине для разных вертикалей у водозабора «Азот» на расстоянии 50, 100, 150 метров от берега.

Из представленных расчетом данных видно, что концентрация 800 мг/л достигается только на глубине более 6 м. Концентрация на поверхности – менее 450 мг/л.

Основной результат выполненных вычислительных экспериментов, как и представленных в [Lepikhin et al., 2020] данных, состоит в том, что вне зависимости от расположения источника поступления в водный объект высокоминерализованных рассолов происходит вертикальная стратификация водных масс по плотности. При этом в придонной области формируется устойчивый слой воды с высокой минерализацией. Соответственно, повышенное содержание хлоридов при заборе воды филиалом «Азот» может быть объяснено только поступлением воды не из поверхностных, а из придонных горизонтов.

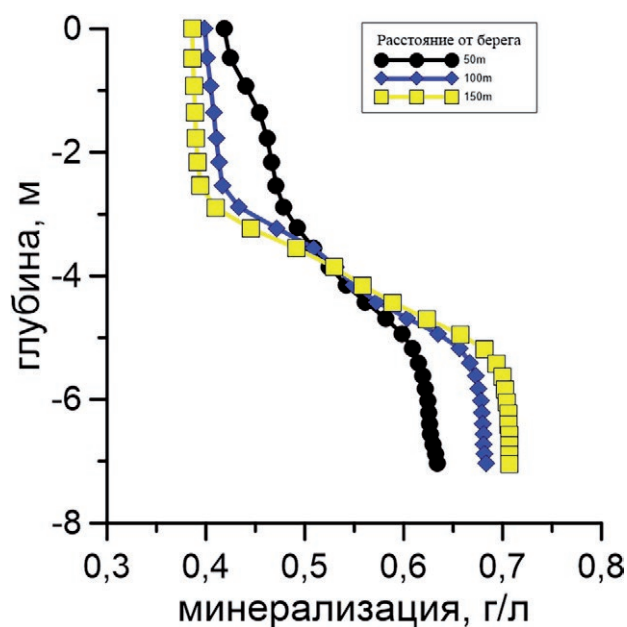


Рис. 7. Распределение минерализации по глубине для разных контрольных вертикалей у водозабора «Азот» на расстоянии 50, 100, 150 метров от берега

Fig. 7. Distribution of mineralization by depth for different control verticals at the water intake 'Azot' at distances of 50, 100, 150 meters from the shore

Выводы

Использование комплексного 1D–2D–3D-моделирования дает ответы для решения вопроса о возможных источниках повышенной минерализации воды в водозаборе филиала «Азот».

1. При наблюдаемом гидрологическом режиме р. Камы и работе Камской ГЭС, а также ветровом режиме не могут фиксироваться обратные течения и, соответственно, не могут поступать загрязняющие вещества, сбрасываемые через водосброс ООО «Сток» в р. Каму (Камское водохранилище), в водозабор «Азота».

2. В качестве возможного источника загрязнения р. Камы в верхней части г. Березники был принят аварийный сброс в устьевой залив р. Толыч интенсивностью 161 кг/с (по общей минерализации), моделирующий фильтрационные разгрузки из шламохранилища «Белое море». Проведенные расчеты на математической модели в трехмерной постановке показали, что на рассмотренном участке р. Камы и источнике загрязнения в устье р. Толыч может наблюдаться повышенная минерализация воды в районе рассматриваемого водозабора менее 1 г/л. Распределение минерализации воды характеризуется значительной вертикальной плотностной стратификацией и высокие концентрации наблюдаются в придонном слое, а в поверхностном горизонте – не более 0,8 г/л. Граница раздела водных масс находится на глубине ~ 6 м.

Обосновано, что даже существенная аварийная ситуация не могла привести к забору воды ненормативного качества при условии, что забор производится из поверхностных горизонтов.

Подход, основанный на сопряженном использовании гидродинамических моделей в 1D–2D–3D-постановке, позволяет объективно подойти к анализу сложной ситуации, связанной с устойчивостью систем водообеспечения крупных промышленных комплексов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания АААА-А18-118022090106-2, при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-41-590013) и гранта РНФ (грант № 17-77-20093).

References

Bogoslovskii B. B. Volny, techeniya i vodnye massy vodoemov: Konspekt lektzii LGMI [Waves, currents and water masses of reservoirs: A compendium of LGMI lectures]. Leningrad: LPI, 1980. 56 p.

Литература

Богословский Б. Б. Волны, течения и водные массы водоемов: Конспект лекций ЛГМИ. Л.: ЛПИ, 1980. 56 с.

Возняк А. А., Лепихин А. П., Ляхин Ю. С., Богомолов А. В. Масштабы и структура диффузного загрязнения Камского водохранилища // Труды VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.). Том II. Качество воды. Геоэкология. Пермь, 2019. С. 34–39.

Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Коллект. монография под рук. В. И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.

Куликов Г. И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Матер. всеобщ. совещ. по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. Вып. 2. Пермь, 1959. С. 1–13.

Лепихин А. П., Богомолов А. В., Тиунов А. А. Особенности течений в верхних бьефах крупных ГЭС, связанных с неравномерностью пропуска через них воды // Горное эхо. 2020. № 1(78). С. 12–15. doi: 10.7242/echo.2020.1.3

Лепихин А. П., Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., Тиунов А. А. К проблеме утилизации избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 185–193.

Филатов Н. Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.

HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016. P. 547.

Lepikhin A. P., Voznyak A. A., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Lyakhin Yu. S., Bogomolov S. V. Studying the formation features and the extent of diffuse pollution formed by large industrial complexes: case study of the Solikamsk – Berezniki Industrial Hub // Water Resources. 2020. Vol. 47, no. 5. P. 744–750. doi: 10.31857/S0321059620050120

Lyubimova T., Parshakova Ya., Lepikhin A., Lyakhin Yu., Tiunov A. The effect of unsteady water discharge through dams of hydroelectric power plants on hydrodynamic regimes of the upper pools of waterworks // Water. 2020a. Vol. 12: 1336. doi: 10.3390/w12051336

Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N. Numerical simulation of highly saline wastewater discharge into water objects to improve discharge devices // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2020b. Vol. 61, no. 7. P. 203–209.

Поступила в редакцию 23.03.2021

Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya [Diffuse water pollution: problems and solutions]. Collective monograph under the direction of V. I. Danilov-Danilyan. Moscow: RAN, 2020. 512 p.

Filatov N. N. Dinamika ozer [Dynamics of lakes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983.

Kulikov G. I. Vliyaniye sbrosa khimicheskoi promyshlennosti na mineralizatsiyu vody Kamskogo vodokhranilishcha v raione g. Berezniki [The influence of the discharge of the chemical industry on the mineralization of the water of the Kama reservoir in the area of the city of Berezniki]. *Mater. vsesoyuzn. soveshch. po voprosam ekspluatatsii Kamskogo vodokhranilishcha* [Proceed. of the All-Union Meeting on the operation of the Kama reservoir]. Iss. 2. Perm', 1959. P. 1–13.

Lepikhin A. P., Bogomolov A. V., Tiunov A. A. Oso-bennosti techenii v verkhnikh b'efakh krupnykh GES, svyazannykh s neravnomernost'yu propuska cherez nikh vody [Features of currents in the upper water pool of large hydroelectric power stations associated with the unevenness of water flow through them]. *Gornoe ekho* [Mountain Echo]. 2020. No. 1(78). P. 12–15. doi: 10.7242/echo.2020.1.3

Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. K probleme utilizatsii izbytochnykh ras-solov predpriyatiyami kaliinoi promyshlennosti v vodnye ob'ekty [To the problem of recycling excess brines by potash industry enterprises into water bodies]. *Fiziko-tekhn. probl. razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Tech. Probl. of Mineral Development]. 2012. No. 2. P. 185–193.

Voznyak A. A., Lepikhin A. P., Lyakhin Yu. S., Bogomolov A. V. Masshtaby i struktura diffuznogo zagryazneniya Kamskogo vodokhranilishcha [The scale and struc-

ture of diffuse pollution of the Kama reservoir]. *Trudy VII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Perm', 30 maya – 2 iyunya 2019 g.)*. Tom II. Kachestvo vody. Geokol. [Proceed. VII All-Russ. sci. pract. conf. with int. part. (Perm, May 30 – June 2, 2019)]. Perm', 2019. P. 34–39.

HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69). Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016. 547 p.

Lepikhin A. P., Voznyak A. A., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Lyakhin Yu. S., Bogomolov S. V. Studying the formation features and the extent of diffuse pollution formed by large industrial complexes: case study of the Solikamsk – Berezniki Industrial Hub. *Water Resources*. 2020. Vol. 47, no. 5. P. 744–750. doi: 10.31857/S0321059620050120

Lyubimova T., Parshakova Ya., Lepikhin A., Lyakhin Yu., Tiunov A. The effect of unsteady water discharge through dams of hydroelectric power plants on hydrodynamic regimes of the upper pools of waterworks. *Water*. 2020a. Vol. 12: 1336. doi: 10.3390/w12051336

Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N. Numerical simulation of highly saline wastewater discharge into water objects to improve discharge devices. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2020b. Vol. 61, no. 7. P. 203–209.

Received March 23, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лепихин Анатолий Павлович

заведующий лабораторией, д. г. н., проф.
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: lepihin49@mail.ru

Веницианов Евгений Викторович

заведующий лабораторией, д. ф.-м. н., проф.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333
эл. почта: eugeniy.venitsianov@gmail.com

Любимова Татьяна Петровна

заведующая лабораторией, д. ф.-м. н., проф.
Институт механики сплошных сред Уральского
отделения РАН – филиал Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН
ул. Академика Королева, 1, Пермь, Россия, 614013
эл. почта: lyubimovat@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович

ведущий инженер
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: alexey.tiunov@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Lepikhin, Anatoly

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: lepihin49@mail.ru

Venitsianov, Eugeny

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
3 Gubkina St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: eugeniy.venitsianov@gmail.com

Lyubimova, Tatyana

Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences (ICMM UB RAS)
1 Akademika Koroleva St., 614013 Perm, Russia
e-mail: lyubimovat@mail.ru

Tiunov, Aleksey

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Паршакова Янина Николаевна

научный сотрудник, к. ф. -м. н.
Институт механики сплошных сред Уральского
отделения РАН – филиал Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН
ул. Академика Королева, 1, Пермь, Россия, 614013
эл. почта: gadiyatova@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич

научный сотрудник, к. т. н.
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: ljahin85@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович

научный сотрудник, к. т. н.
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: whitewing85@mail.ru

Parshakova, Yanina

Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences (ICMM UB RAS)
1 Akademika Koroleva St., 614013 Perm, Russia
e-mail: gadiyatova@mail.ru

Lyakhin, Yuri

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: ljahin85@mail.ru

Bogomolov, Andrey

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: whitewing85@mail.ru

УДК 532.531:061.6 (470.22)

ИЗУЧЕНИЕ ВОДОПАДОВ КАРЕЛИИ ИНСТИТУТОМ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА КарНЦ РАН

**М. С. Потахин^{1,2}, А. В. Толстиков¹, М. С. Богданова¹,
А. П. Георгиев¹, И. Ю. Георгиевский¹, С. Б. Потахин²**

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

² Петрозаводский государственный университет, Россия

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН проводит комплексные географические исследования водопадов Республики Карелия. Эта работа стала возможна благодаря грантовой поддержке Русского географического общества в рамках проектов «Историко-географические памятники Европейского Севера России» (2010 г.), «Алмазна сыплется гора...»: неизвестные водопады Карелии» (2015 г.) и «Неизвестные водопады Европейского Севера России» (2020 г.). В ходе реализации проектов на территории республики выявлено и каталогизировано более 90 водопадов, 46 из них изучены во время экспедиционных исследований в Северном Приладожье (2015 г.) и на севере Карелии (2020 г.). Материалы исследований вошли в базу данных «Водопады Карелии» и стали основой для разработки информационно-справочной системы, доступной широкому кругу пользователей. Результаты работы представлены на многочисленных конференциях и в учебных пособиях кафедры туризма Петрозаводского государственного университета в виде рекомендаций по охране и рекреационному использованию водопадов.

Ключевые слова: водопад; Русское географическое общество; Карелия; Северное Приладожье.

**M. S. Potakhin, A. V. Tolstikov, M. S. Bogdanova, A. P. Georgiev,
I. Yu. Georgievsky, S. B. Potakhin. STUDY OF KARELIAN WATERFALLS BY
THE NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE, KARELIAN RESEARCH
CENTRE RAS**

The Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS carries out comprehensive geographic studies of waterfalls in the Republic of Karelia. These activities were enabled by grant support from the Russian Geographical Society within the projects “Historical and geographical monuments of the European North of Russia” (2010), “Unknown waterfalls of Karelia” (2015) and “Unknown waterfalls of the European North of Russia” (2020). During the projects, more than 90 waterfalls in the territory of the republic were identified and cataloged, 46 of them were studied during expeditions to the Northern Ladoga area (2015) and the northern part of Karelia (2020). The research material was entered into the “Waterfalls of Karelia” database and formed the basis for the development of an information and reference system open to a wide range of users. The results of the work have been presented at numerous conferences and in teaching aids for the Tourism Department of the Petrozavodsk State University in the form of recommendations for the protection and recreational use of the waterfalls.

Key words: waterfall; Russian Geographical Society; Karelia; Northern Ladoga area.

Введение

Водопады – уникальные памятники природы, представляющие собой поле взаимодействия и результат совместной деятельности трех геосфер: атмосферы, гидросферы и литосферы. В водопадах протекают сложнейшие природные процессы, такие как гидроаэроанизация (образование в воздухе гидроионов при распылении воды), флотация (разделение мелких твердых частиц, основанное на различии их в смачиваемости водой) и эрозия или кавитация (разрушение горных пород под действием субвертикально падающей воды). Несмотря на всю уникальность водопадов как природных феноменов, в научной литературе – географической, гидрологической, геоморфологической и др. – им уделяется не так много внимания [Young, 1985; Арсеев, 1987; Hudson, 1998, 2006; Уфимцев, 2016; Goudie, 2020].

В 1956 г. вышла в свет монография «Водопады Карелии» за авторством Сергея Владимировича Григорьева – выдающегося гидролога и гидроэнергетика, основателя Отдела водных проблем Карельского филиала АН СССР [Филатов, Собисевич, 2018]. Очерк, составленный на основе авторских исследований гидроэнергетических ресурсов рек Карелии и на анализе литературных источников (работ ученых и краеведов, а также художественных произведений), почти сразу стал библиографической редкостью. На протяжении четверти века он оставался единственной в отечественной научной литературе работой, целиком посвященной водопадам [Арсеев, 1987]. Наряду с монографией «Внутренние воды Карелии и их хозяйственное использование» [Григорьев, 1961] и библиографическим указателем «Внутренние воды Карелии и их использование» [Григорьев, 1964] книга о водопадах стала подведением итогов многолетней деятельности ученого по исследованию водных ресурсов Карелии.

Исследования Отдела водных проблем (с 1991 г. – Института водных проблем Севера), за исключением работ по обоснованию ряда ООПТ (национальный парк «Паанаярви», памятники природы «Белые мосты» и «Куми-порог»), не были связаны с водопадами. Интерес к изучению этих водных объектов возник в последние десятилетия, и в первую очередь в связи с развитием коммерческого туризма и вовлечением их в рекреационную сферу. Так, при поддержке Русского географического общества (РГО) Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН) проведены комплексные работы по исследованию водопадов Карелии. Они осуществлялись в рамках гран-

тов «Историко-географические памятники Европейского Севера России» (2010 г.), «Алмазная сыплется гора...»: неизвестные водопады Карелии» (2015 г.) и «Неизвестные водопады Европейского Севера России» (2020 г.).

Водопады как элемент озерно-речных систем Карелии

Карелию называют краем тысячи озер. В ее пределах частично расположены великие европейские озера – Ладожское и Онежское, а также более 60 тыс. озер площадью от 1 га [Озера..., 2013]. С учетом водоемов меньшего размера их численность в разы больше. Подавляющее большинство озерного фонда составляют небольшие лесные водоемы без видимого поверхностного стока, так называемые «лаббы». Озера большего размера, как правило, соединяются протоками и образуют обширные озерно-речные системы. Их распространенным элементом являются пороги и водопады. В среднем на порожистые участки приходится не менее 10–12 % общего протяжения крупных и средних рек, на малых водотоках пороги могут составлять до 50 % их длины [Григорьев, 1956]. На таких крупных реках, как Ковда, Кемь, Суна, Шуя и Водла, пороги насчитываются десятками, водопады же встречаются реже (рис. 1).

До сих пор точно не установлено, сколько водопадов на территории Карелии. В вышедших в начале прошлого века туристских описаниях водопадов Олонецкой губернии [Олонецкие..., 1907] представлена характеристика водопадов р. Суны – Кивача, Пор-Порога и Гирваса, а также приводятся отдельные сведения еще о 15 водопадах. В книге С. В. Григорьева «Водопады Карелии» [1956] дано подробное описание 12 наиболее крупных и популярных водопадов, по 16 малоизвестным водопадам приводятся отрывочные данные. В современном путеводителе по Карелии [Кучко и др., 2011] дана оценка общей численности водопадов – около 30 и приводится описание десяти наиболее популярных у туристов из их числа. В различных интернет-ресурсах можно отыскать упоминания о сотне водопадов на территории Карелии [Потахин и др., 2014].

Обилие порогов и водопадов, характерное для территории республики, объясняется геолого-тектоническими особенностями и геологической историей, а именно расположением в пределах Фенноскандинавского (Балтийского) кристаллического щита, в области развития последнего валдайского оледенения. Современная гидрографическая сеть региона очень молода, так как стала формироваться только

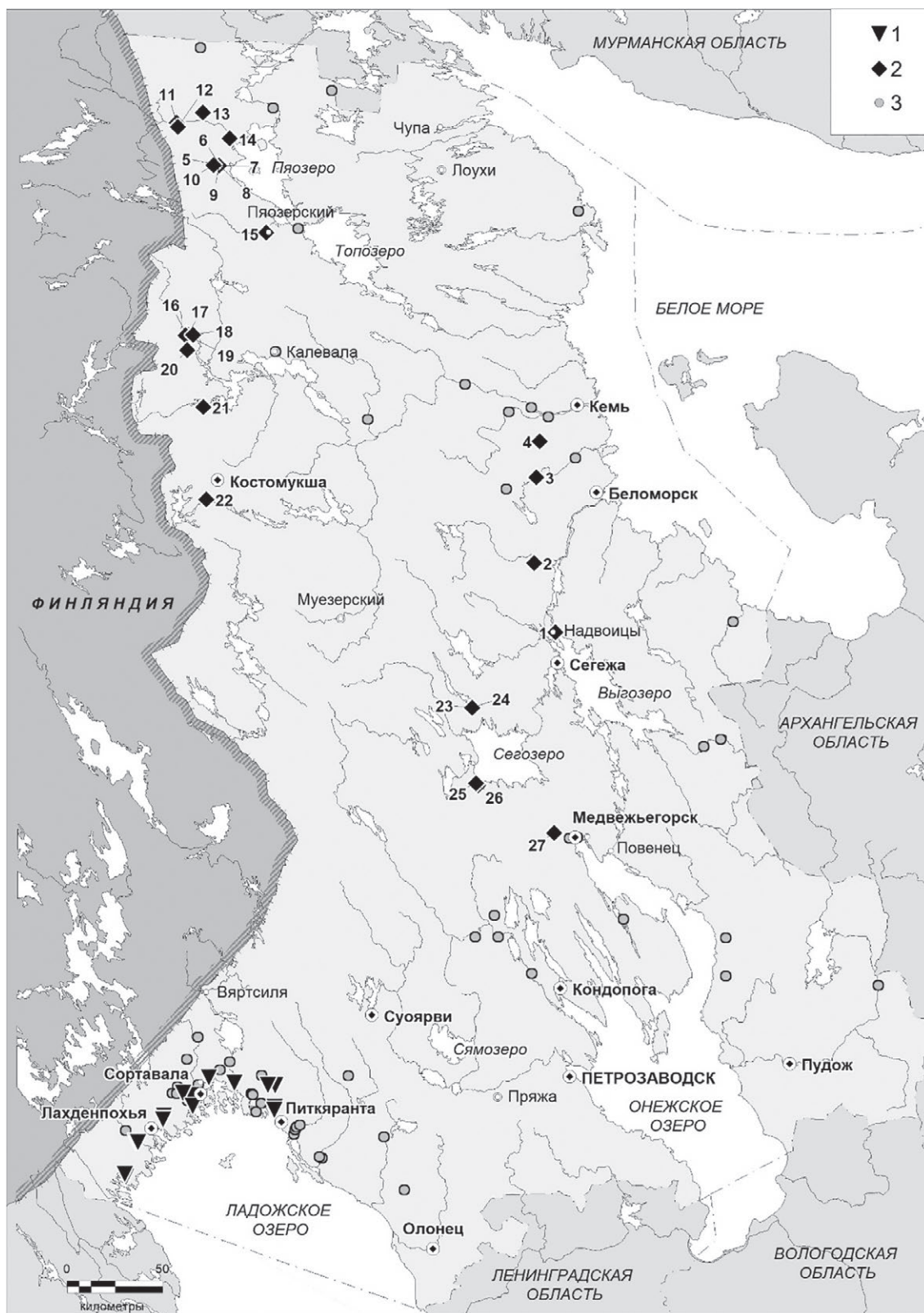


Рис. 1. Распределение водопадов по территории Республики Карелия:

1 – водопады, изученные во время экспедиционных исследований 2015 г.; 2 – водопады, изученные во время экспедиционных исследований 2020 г. (нумерация как в табл. 2); 3 – водопады, выявленные в ходе камеральных исследований (2010–2021 гг.)

Fig. 1. Distribution of waterfalls over the territory of the Republic of Karelia:

1 – waterfalls studied during the expeditionary research in 2015; 2 – waterfalls studied during the expeditionary research in 2020 (numbered as in Table 2); 3 – waterfalls identified during the cameral research (2010–2021)

после схода ледника (около 15 тыс. л. н.). Реки, до достижения ими профиля равновесия, имеют общую тенденцию к врезанию. В условиях крепких, устойчивых к размыву горных пород кристаллического щита процесс врезания занимает длительное время (сотни тысяч лет), поэтому ни одна речная система еще не достигла состояния профиля равновесия.

При этом следует отметить большую роль тектонических процессов в образовании водопадов. На фоне интенсивного гляциоизостатического поднятия земной коры в течение всего послеледниковья происходили сильные сейсмические сотрясения. В результате неравномерного движения отдельных блоков в рельефе возникала ступенчатость. Она, в свою очередь, приводила к ступенчатости продольного профиля речных долин и могла стать причиной возникновения некоторых водопадов. Например, формирование ступени водопада Кивач на р. Суна связано с тектоническими движениями блоков по трещинам субширотного и северо-западного простираения, широко развитым в пределах распространения пластовых интрузий габбро-долеритов [Демидов и др., 2006]. Эрозионное воздействие реки на формирование уступа в прочных, хотя и неоднородных кристаллических породах имело второстепенное значение, поскольку образование реки в районе водопада относится всего лишь к первой половине атлантического периода (8–7 тыс. л. н.).

Водопады являются важным объектом традиционного природопользования. Со времен средневековья они использовались местным населением для создания лесопильных и мукомольных мельниц, а с начала XX в. – гидроэлектростанций (ГЭС). В процессе гидротехнического строительства, особенно в результате создания крупных каскадов ГЭС, многие водопады были преобразованы или вовсе утрачены [Григорьев, 1961]. Например, при создании Сунского каскада ГЭС в 1930-е годы выше водопада Гирвас построили плотину. Речные воды были направлены по каналу через Пальеозерскую ГЭС на оз. Палье, далее на оз. Санда и Кондопожскую ГЭС. В результате этой трансформации нижнее течение реки искусственно отрезано от основной системы. Сунским водопадам нанесен непоправимый ущерб – Гирвас и Пор-Порог полностью обсохли, а Кивач потерял большую часть своей мощи. При этом во время ежегодных весенних пусков воды через водосброс ГЭС образуется водопад «Новый Гирвас», общий перепад высот которого составляет около 30 м. Подобные гидротехнические преобразования коснулись многих порогов и водопадов на севере Карелии, и в первую

очередь расположенных в бассейнах крупнейших рек – Выга, Кеми и Ковды. Так, в результате строительства Беломорско-Балтийского канала (1930-е гг.) произошло изменение Воицких падунов на р. Нижний Выг, в ходе проектирования и создания каскада Кемских ГЭС (1930–1970-е гг.) исчезли водопады Ужма, Падь-Юма, а в результате строительства Кумской ГЭС и создания Кумского водохранилища (1960–1970-е гг.) утрачены Софьянгский, Кумский водопады и т. д. [Литвиненко, 2003].

В настоящее время в связи с развитием коммерческого туризма карельские водопады все более востребованы как экскурсионные объекты. Большой интерес они представляют и как объекты спортивного водного туризма. На протяжении многих лет лидером по количеству посещений оставался водопад Кивач. В середине XX в. число туристов и экскурсантов, ежегодно посещающих Кивач, достигало 10 тыс. чел. [Андреев, 1963]. К началу XXI в. поток возрос многократно, превысив в 2016 г. 130 тыс. чел. [Кутенков, 2018]. В настоящее время по количеству посетителей его обошел водопад Ахинкоски, активно посещаемый в связи с развитием горного парка «Рускеала» (в 2019 г. парк посетило более 320 тыс. чел.). Увеличению потока туристов способствует развитие туристской инфраструктуры (в первую очередь транспортной), а также создание системы организованного туризма. Так, в рамках развития туристского кластера в южной части республики ведется строительство подъездной дороги к водопаду Юканкоски (Белые мосты). Развивается система организованного туризма в районе «Долины водопадов» и водопада «Новый Гирвас», есть проекты создания туристской инфраструктуры в районе Воицкого падуна и ряда других.

Изучение водопадов Северного Приладожья

Начало исследований авторским коллективом водопадов Карелии было положено в 2010 г. в рамках гранта РГО «Историко-географические памятники Европейского Севера России» [Богданова и др., 2010, 2011]. В ходе комплексной экспедиции по проекту изучено несколько водопадов, расположенных в пределах Северного Приладожья: Койриноя (р. Койринйоки), Юканкоски (р. Кулисмайоки), Ахинкоски и Рюмякоски (р. Тохмайоки).

Продолжением этих исследований стал проект «Алмазна сыплется гора...»: неизвестные водопады Карелии», поддержанный РГО в 2015 г., целью которого было выявление и комплексное географическое исследование малоизвестных

водопадов Карелии для их дальнейшего использования в рекреации и туризме. В ходе него для специалистов в области туризма и охраны окружающей среды разработаны рекомендации по рекреационному использованию и сохранению водопадов. В рамках проекта в мае 2015 года проведена экспедиция по изучению водопадов Северного Приладожья [Потахин и др., 2015а], историко-географического района Карелии, характеризующегося наибольшей их концентрацией. Во время экспедиции исследовано 19 объектов (рис. 2, табл. 1), расположенных в различных частях района.

Обилие водопадов, характерное для Северного Приладожья, объясняется орографическими и гидрологическими особенностями. Здесь, в пределах развития блоково-грядового денудационно-тектонического рельефа, характеризующегося высокой горизонтальной и умеренной вертикальной расчлененностью, распространены небольшие короткие водотоки. Они отличаются невыработанным ступенчатым продольным профилем и, как следствие,

обилием порогов и водопадов [Лукашов, 2003]. Именно здесь находятся наиболее крупные и популярные карельские водопады, в том числе Юканкоски, один из самых высоких, и Ахинкоски, один из самых посещаемых.

Приладожские водопады стали известны в нашей стране не так давно. Северное Приладожье наряду с Карельским перешейком и некоторыми другими территориями Финляндии вошло в состав СССР после Второй мировой войны. Практически всю вторую половину XX в. из-за приграничного положения этих территорий расположенные здесь водопады были труднодоступны и практически не упоминались в отечественной научной литературе. Только с 1990-х гг. они стали активно посещаться исследователями и туристами. Следует отметить, что эти водопады в прошлом широко использовались в хозяйственной деятельности (табл. 1). Остатки бетонных плотин и зданий машинных залов ГЭС встречаются на водопадах рек Соскуанйоки, Китенйоки, Тохмаййоки и др. Многие электростанции функционируют до сих пор: ГЭС «Хямеко-

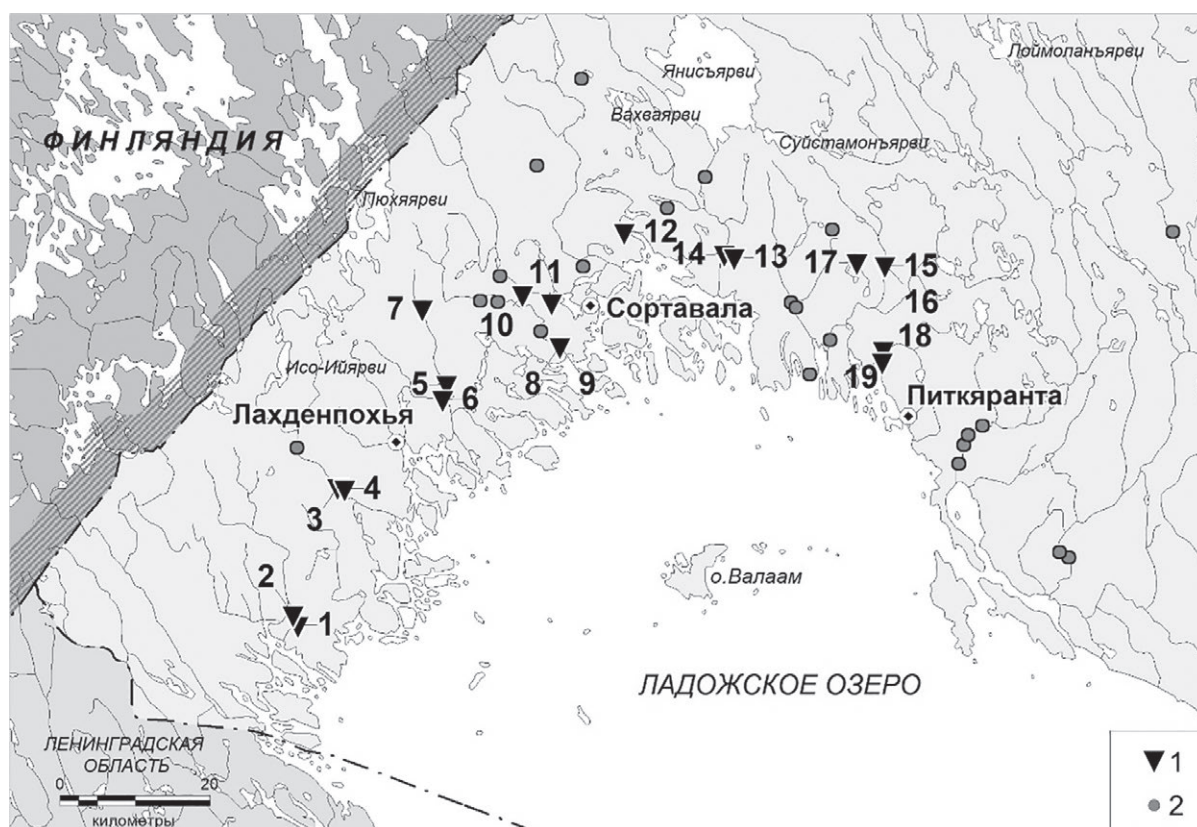


Рис. 2. Распределение водопадов по территории Северного Приладожья:

1 – водопады, изученные во время экспедиционных исследований 2015 г. (нумерация как в табл. 1); 2 – водопады, выявленные в ходе камеральных исследований (2010–2021 гг.)

Fig. 2. Distribution of waterfalls across the Northern Ladoga area:

1 – waterfalls studied during the expeditionary research in 2015 (numbered as in Table 1); 2 – waterfalls identified during the cameral research (2010–2021)

Таблица 1. Основные характеристики исследованных водопадов Северного Приладожья

Table 1. Main characteristics of the studied waterfalls of the Northern Ladoga area

№ No.	Название Name	Река River	Высота падения, м Distance of fall, m	Тип Type	Примечание Note
1.	без названия no name	Соскуанйоки Soskuanjoki	3,6	водопад-каскад waterfall-cascade	Бетонная плотина, разрушенное здание ГЭС Concrete dam, destroyed hydroelectric power station
2.	«	«	1,4	водопад waterfall	«
3.	Конттиоваранкоски Kontiovarankoski	Иййоки Iijoki	2,0	каскад cascade	«
4.	без названия no name	руч. Ниваоя (Иййоки) Nivaoya stream (Iijoki)	7,0	«	–
5.	без названия («Кривая труба») no name ('Krivaya Truba')	Мийналанйоки Miinalanjoki	8,0	водопад-каскад waterfall-cascade	Бетонная плотина, бетонный водопровод Concrete dam, concrete water pipe
6.	без названия no name	руч. Питкя (Мийналанйоки) Pitkya stream (Miinalanjoki)	2,0	водопад waterfall	Разрушенная бетонная плотина Destroyed concrete dam
7.	«	Ниванйоки (Мийналанйоки) Nivanjoki (Miinalanjoki)	менее 1,0 less than 1.0	попорог rapids	«
8.	«	Савайнйоки Savainjoki	менее 1,0 less than 1.0	«	–
9.	«	«	6,0	водопад waterfall	Бетонная плотина, разрушенное здание ГЭС Concrete dam, destroyed hydroelectric power station
10.	Ниимикоски Niemikoski	Китенйоки Kitenjoki	3,5	водопад-каскад waterfall-cascade	Разрушенное здание бумажной фабрики Destroyed paper mill building
11.	без названия no name	«	6,0	«	Разрушенное здание ГЭС Destroyed hydroelectric power station
12.	Каллиокоски Kalliokoski	Тохмаййоки Tokhmajoki	н/д n. d.	–	Действующая ГЭС «Каллиокоски» (975 кВт) Operating Kalliokoski hydroelectric power station (975 kW)
13.	без названия no name	руч. без названия (из оз. Ристиярви) untitled stream (from Lake Ristijarvi)	1,5	водопад waterfall	–
14.	Ляскелянкоски Lyaskelyankoski	Янисйоки Yanisjoki	н/д n. d.	водослив spill way	Действующая ГЭС «Ляскеля» (4,8 МВт) Operating Lyaskelya hydroelectric power station (4.8 MW)
15.	Юканкоски-1 Yukankoski-1	Кулисмаййоки Kulismajoki	18,0	водопад waterfall	Памятник природы «Белые мосты» Natural monument 'Belye Mosty' ('White Bridges')
16.	Юканкоски-2 Yukankoski-2	«	11,0	«	«
17.	без названия (Роскеланкоски) no name (Roskelankoski)	руч. без названия (из оз. Андронино) untitled stream (from Lake Andronino)	8,0	«	–

Окончание табл. 1

Table 1 (continued)

№ No.	Название Name	Река River	Высота падения, м Distance of fall, m	Тип Type	Примечание Note
18.	Койриноя-1 («Мельничный») Koirinoya-1 (‘Mel’nichnyi’)	Койринйоки Koirinjoki	5,0	«	Бетонная плотина, разрушенное здание ГЭС Concrete dam, destroyed hydroelectric power station
19.	Койриноя-2 («Земляничный») Koirinoya-2 (‘Zemlyanichnyi’)	«	6,0	водопад-каскад waterfall-cascade	Фрагменты олово-медеплавильного завода Fragments of a tin-copper smelter

ски», «Харлу» и «Ляскеля» на р. Янисйоки, ГЭС «Суури-йоки» и «Пиени-йоки» на р. Тулеймайоки. Есть примеры строительства новых электростанций на месте разрушенных, например, ГЭС «Рюмякоски» и «Каллиокоски» на р. Тохмайоки. Таким образом, помимо природной уникальности приладожские водопады отличает то, что их можно рассматривать как характерные примеры гидротехнического освоения Карелии. Данную особенность, безусловно, надо учитывать при проектировании туристских маршрутов и создании туристских продуктов на территории Северного Приладожья.

Изучение водопадов Северной Карелии

Водопады юга Республики Карелия (Северное Приладожье), наряду с водопадами северо-запада Ленинградской области (Карельский перешеек), достаточно известны, изучены и задействованы в индустрии туризма. При этом водопады Северной Карелии и Кольского полуострова малоизвестны, их рекреационный потенциал не оценен, они в меньшей степени используются в туризме. Именно поэтому авторским коллективом был разработан проект «Неизвестные водопады Европейского Севера России», целью которого является комплексное исследование современного состояния водопадов Севера европейской территории на-

шей страны. Основные задачи проекта: выявление малоизвестных водопадов и проведение их комплексных экспедиционных исследований, создание единой базы данных водопадов Европейского Севера России, а также разработка рекомендаций по рекреационному использованию и сохранению водопадов. В рамках проекта, при поддержке экспедиционного гранта РГО (2020 г.), проведено комплексное географическое исследование водопадов севера Карелии и юга Кольского полуострова.

Экспедиция проходила с 19 сентября по 4 октября 2020 г. и заняла 16 дней. Маршрут протяженностью более 3000 км пролегал по территории Республики Карелия и Мурманской области. Всего исследовано 30 водопадов, 27 из которых находятся в границах республики (рис. 1, табл. 2). В ходе выполнения полевых работ определялись географические координаты и основные морфо-гидрологические характеристики объектов (высота и угол падения, ширина потока и др.), выявлялись особенности окружающего рельефа, проводилась оценка хозяйственного и рекреационного использования, антропогенного воздействия, велась профессиональная фотосъемка и т. д. Для измерения горизонтальных и вертикальных характеристик водопадов использовался нивелир оптический SOKKIA B40 и теодолит электронный VEGA Teo5B (рис. 3). Исследованные

Таблица 2. Основные характеристики исследованных водопадов Северной Карелии

Table 2. Main characteristics of the investigated waterfalls of the North Karelia

№ No.	Название Name	Река (бассейн) River (basin)	Высота общая (наибольшей ступени), м Overall height (highest step), m	Тип Type	Примечание Note
1.	Воицкий падун Voitskii padun	Нижний Выг (ББК) Nizhniy Vyg (WSC)	3,0	водопад waterfall	Изменен в результате строительства ББК Changed as a result of the construction of the White Sea Canal
2.	Падун Padun	Тунгуда (ББК) Tunguda (WSC)	1,0	водослив spill way	–

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№ No.	Название Name	Река (бассейн) River (basin)	Высота общая (наибольшей ступени), м Overall height (highest step), m	Тип Type	Примечание Note
3.	Московский Moskovskii	Шуя (Шуя) Shuya (Shuya)	4,0 (1,7)	каскад cascade	—
4.	без названия («Борода Унтамо») no name ('Untamo's Beard')	Олонга (Шуя)	12,0 (2,4)	«	—
5.	без названия (1-й на Тавойоки) no name (1 st on Tavojoki)	Тавойоки (Ковда) Tavojoki (Kovda)	3,4	«	—
6.	без названия (2-й на Тавойоки) no name (2 nd on Tavojoki)	«	1,4	водопад waterfall	—
7.	без названия (3-й на Тавойоки) no name (3 rd on Tavojoki)	«	2,9	каскад cascade	—
8.	без названия (4-й на Тавойоки) no name (4 th on Tavojoki)	«	1,2	водослив spill way	—
9.	без названия (5-й на Тавойоки) no name (5 th on Tavojoki)	«	1,6	«	—
10.	без названия (6-й на Тавойоки) no name (6 th on Tavojoki)	«	5,0	водоскат water slide	—
11.	Мянтюкоски Myantyukoski	Мянтюйоки (Ковда) Myantjujoki (Kovda)	13,4 (4,2)	каскад cascade	Национальный парк «Паанаярви» Остатки мельницы Paanajarvi National Park Remains of the mill
12.	Селькякоски Selkyakoski	Селькяйоки (Ковда) Selkyajoki (Kovda)	13,0 (4,5)	«	«
13.	Муткакоски Mutkakoski	Муткайоки (Ковда) Mutkajoki (Kovda)	5,3 (3,0)	«	Национальный парк «Паанаярви» Paanajarvi National Park
14.	Киваккакоски Kivakkakoski	Оланга (Ковда) Olanga (Kovda)	12,3 (3,8)	каскад- водоскат cascade- water slide	«
15.	Тухка-падун Tuhka-padun	Корпийоки (Ковда) Korpijoki (Kovda)	10,5 (2,8)	каскад cascade	—
16.	Куми (Куми-порог) Kumi (Kumi-porog)	Войница (Кемь) Voinitsa (Kem)	13,5 (8,0)	водоскат water slide	Памятник природы «Куми-порог» Natural monument 'Kumi-porog'
17.	Дюрикко Dyurikko	«	6,0	«	«
18.	Тайвал Taival	«	1,2	водослив spill way	«
19.	Тухка (Тухко) Tukhka (Tukhko)	«	9,6	водоскат water slide	«
20.	Колива Koliva	Куржма (Кемь) Kurzhma (Kem)	2,2 (1,2)	водослив spill way	—
21.	Кяунас (Кёнис) Kyaunas (Kenis)	Судно (Кемь) Sudno (Kem)	2,5 (1,5)	водоскат water slide	—
22.	Царь-порог Tsar-porog	Каменная (Кемь) Kamennaya (Kem)	5,0	«	Государственный природный заповедник «Костомукшский» Kostomukshsky State Natural Reserve

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№ No.	Название Name	Река (бассейн) River (basin)	Высота общая (наибольшей ступени), м Overall height (highest step), m	Тип Type	Примечание Note
23.	без названия (Шалговаара-1) no name (Shalgovaara-1)	без назв. (ББК) no name (WSC)	11,5	«	—
24.	без названия (Шалговаара-2) no name (Shalgovaara-2)	«	1,9	«	—
25.	без названия (Гормозерка-1) no name (Gormozerka-1)	Гормозерка (ББК) Gormozerka (WSC)	2,7 (1,7)	каскад cascade	—
26.	без названия (Гормозерка-2) no name (Gormozerka-2)	«	3,5 (1,0)	«	—
27.	Падун Padun	Остер (Кумса) Oster (Kumsa)	6,5 (2,6)	«	—



Рис. 3. Полевые исследования водопада-каскада на р. Олонга в сентябре 2020 г. (экспедиция в рамках проекта «Неизвестные водопады Европейского Севера России»)

Fig. 3. Field research of the waterfall-cascade on the Olonga River in September 2020 (expedition within the project 'Unknown waterfalls of the European North of Russia')

водопады Северной Карелии (табл. 2) располагаются как в пределах Прибеломорской низменности (№№ 1–4), так и на возвышенности Маанселькя (№№ 5–21) и Западно-Карельской

возвышенности (№№ 22–27). От водопадов Северного Приладожья они отличаются разнообразием характеристик и типов, а также меньшей гидротехнической освоенностью.

Заключение

Водопады являются «визитной карточкой» Республики Карелия, одним из ее туристских брендов. Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН реализуются проекты по комплексному географическому исследованию данных водных объектов. Эти работы стали возможны

благодаря поддержке РГО в рамках грантов «Историко-географические памятники Европейского Севера России» (2010 г.), «Алмазна сыплется гора...»: неизвестные водопады Карелии» (2015 г.) и «Неизвестные водопады Европейского Севера России» (2020 г.).

В процессе анализа литературных, архивных и интернет-источников, а также экспеди-

ИНФОРМАЦИОННАЯ КАРТОЧКА		Номер № 4		Название	Юканкоски-I (Белые мосты)
Местонахождение				Фото	
Расположен на р. Кулисмайоки в Питкярантском районе Республики Карелия, на территории Питкярантского городского поселения в 35 км от города Питкяранта и в 13 км от деревни Леппясилта					
Размещение					
					
Координаты					
Широта, °с.ш.	61.7529	Долгота, °в.д.	31.4107		
Тип		Высота падения, м			
Водопад		18.0			
Общее описание объекта					
Юканкоски или Белые мосты — комплекс водопадов на р. Кулисмайоки. Представляет собой два водопада расположенных на рукавах реки, разделенных островом. На правом рукаве высота отвесного падения реки достигает 18 м, на левом — 11 м. Юканкоски является самым высоким водопадом Северного Приладожья. В 1999 году решением правительства Республики Карелии на прилегающей к водопаду территории был учрежден гидрологический памятник природы регионального значения «Белые мосты» площадью 87.9 га. Памятник природы создан в целях сохранения в естественном состоянии водопада и тяготеющих к нему ценных природных комплексов					
Использование				Природоохранное использование (особо охраняемая природная территория) Рекреационное использование (объект экскурсионно-познавательного туризма)	
Современное состояние				Предложения по сохранению и использованию	
Водопад является популярным туристским объектом. От трассы А-121 «Сортавала» к нему вела грунтовая дорога неудовлетворительного состояния (в настоящее время дорога реконструируется) На поляне перед водопадом расположена площадка для кемпинга, информационные аншлаги, спуск к водопаду оборудован деревянной лестницей. Объекты инфраструктуры нуждаются в реконструкции				Необходимо оборудовать автомобильную площадку с соответствующей туристской инфраструктурой Создание смотровых площадок и реконструкция подходов к водопаду	

Рис. 4. Пример типовой информационной карточки исследованного объекта

Fig. 4. An example of a typical information card of an investigated object

ционных исследований выявлено и каталогизировано более 90 объектов (рис. 1). Водопады отличаются разнообразием характеристик и распределены по территории неравномерно. Наибольшая их концентрация наблюдается в юго-западной (Северное Приладожье) и северо-западной (возвышенность Маанселькя) частях, наименьшая – в центральной и западной (Западно-Карельская возвышенность). Объясняется это как природными особенностями, так и общей изученностью территории Республики Карелия.

В ходе экспедиционных работ в Северном Приладожье (2015 г.) и Северной Карелии (2020 г.) проведены исследования 46 объектов (табл. 1 и 2). Определялись географические координаты и основные морфо-гидрологические характеристики исследуемых объектов, выявлялись особенности окружающего рельефа, проводилась оценка хозяйственного и рекреационного использования, а также антропогенного воздействия. Материалы исследований вошли в базу данных, стали основой для разработки информационных карточек (рис. 4), а в дальнейшем – информационно-справочной системы «Водопады Карелии» [Потахин и др., 2015б], доступной широкому кругу пользователей. Результаты работ по проектам представлены на конференциях и в учебных пособиях кафедры туризма Петрозаводского государственного университета в виде рекомендаций по рекреационному использованию и охране водопадов Карелии [Потахин и др., 2014, 2017, 2018; Кирилина и др., 2016 и др.].

Исследование проведено при поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество».

Литература

- Андреев К. А. Заповедник Кивач: путеводитель. Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1963. 80 с.
- Арсеев Г. Т. Водопады. М.: Мысль, 1987. 127 с.
- Богданова М. С., Георгиевский И. Ю., Гриппа С. П., Дмитриев В. Л., Лобанова Н. В., Медведев П. В., Потахин М. С., Потахин С. Б., Толстиков А. В., Филатов Н. Н. Экспедиция «Историко-географические памятники Европейского Севера России» // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 143.
- Богданова М. С., Гриппа С. П., Лобанова Н. В., Медведев П. В., Потахин М. С., Потахин С. Б., Русанов Ю. В., Толстиков А. В., Филатов Н. Н. Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер. Петрозаводск: Verso, 2010. 95 с.
- Григорьев С. В. Водопады Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1956. 76 с.
- Григорьев С. В. Внутренние воды Карелии и их хозяйственное использование. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1961. 140 с.
- Григорьев С. В. Внутренние воды Карелии и их использование (библиографический аннотированный указатель). Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1964. 618 с.
- Демидов И. Н., Лукашов А. Д., Ильин В. А. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды КарНЦ РАН. 2006. Вып. 10. С. 22–33.
- Кирилина В. М., Светов С. А., Медведев П. В., Шеков В. А., Шеков К. В., Захарченко С. О., Колесникова Н. В., Плотникова В. С., Потахин М. С., Назарова Л. Е., Хуусконен Н. М., Шевченко В. И. Природный и историко-культурный потенциал Республики Карелия как предпосылка развития регионального туризма. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. 80 с.
- Кучко А. А., Алуферова Н. В., Байбусинов Ш. Ш., Вахрамеева Т. И., Детчуев Б. Ф., Лобанов В. П., Лобанова Н. В., Макарихин В. В., Пашков А. М. Карелия: путеводитель. Петрозаводск: Скандинавия, 2011. 288 с.
- Кутенков А. П. Водопад Кивач: справочник. Петрозаводск: Скандинавия, 2018. 80 с.
- Литвиненко А. В. К истории гидроэнергетического освоения водных объектов Карелии // Экологические исследования природных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 21–27.
- Лукашов А. Д. Геоморфологические условия // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 13–19.
- Озера Карелии. Справочник / Под. ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Олонецкие водопады Кивач, Поръ-Порог и Гирвас в описаниях туристов / Сост. Н. С. Шайжин. Петрозаводск: Олонецкая губ. тип., 1907. 58 с.
- Потахин М. С., Богданова М. С., Толстиков А. В. Водопады Карелии – перспективные объекты туризма // География: традиции и инновации в науке и образовании. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2014. С. 264–268.
- Потахин М. С., Богданова М. С., Толстиков А. В., Потахин С. Б. Водопады Северного Приладожья как объекты природного и культурного наследия // Природное и культурное наследие: междисциплинарные исследования, сохранение и развитие. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2015а. С. 138–142.
- Потахин М. С., Богданова М. С., Толстиков А. В. Разработка информационно-справочной системы «Водопады Карелии» // География: развитие науки и образования. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2015б. С. 583–586.
- Потахин М. С., Хуусконен Н. М., Потахин С. Б. Разработка природоведческой экскурсии «Водопады Северного Приладожья» // Туризм и образование: исследования и проекты. Петрозаводск: ПетрГУ, 2017. С. 87–90.
- Потахин М. С., Хуусконен Н. М., Потахин С. Б., Захарченко С. О. Разработка природоведческой

экскурсии «Водопады Северного Приладожья». Петрозаводск: ПетрГУ, 2018. 49 с.

Уфимцев Г. Ф. Водопады // Земля и вселенная. 2014. № 1. С. 94–105.

Филатов Н. Н., Собисевич А. В. Основатель отдела водных проблем Карельского филиала АН СССР (к 130-летию со дня рождения С. В. Григорьева) // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 130–133.

Goudie A. S. Waterfalls: forms, distribution, processes and rates of recession // Quaestiones Geographicae. 2020. Vol. 39(1). P. 59–77. doi: 10.2478/quageo-2020–0005

References

Andreev K. A. Zapovednik Kivach: putevoditel' [Kivach nature reserve: a guidebook]. Petrozavodsk: Karel. kn. izd-vo, 1963. 80 p.

Arseev G. T. Vodopady [Waterfalls]. Moscow: Mysl', 1987. 127 p.

Bogdanova M. S., Georgievskii I. Yu., Grippa S. P., Dmitriev V. L., Lobanova N. V., Medvedev P. V., Potakhin M. S., Potakhin S. B., Tolstikov A. V., Filatov N. N. Ekspeditsiya "Istoriko-geograficheskie pamyatniki Evropeiskogo Severa Rossii" [The expedition "Historical and geographical monuments of the European North of Russia"]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 143.

Bogdanova M. S., Grippa S. P., Lobanova N. V., Medvedev P. V., Potakhin M. S., Potakhin S. B., Rusanov Yu. V., Tolstikov A. V., Filatov N. N. Prirodnye i kul'turno-istoricheskie pamyatniki Belogo morya, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer [Natural and cultural-historical monuments of the White Sea, Lakes Onego and Ladoga]. Petrozavodsk: Verso, 2010. 95 p.

Demidov I. N., Lukashov A. D., Il'in V. A. Rel'ef zapovednika "Kivach" i istoriya geologicheskogo razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v chetvertichnom periode [The relief of the Kivach reserve and the history of the geological development of the northwestern Onego area in the Quaternary]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2006. Iss. 10. P. 22–33.

Filatov N. N., Sobisevich A. V. Osnovatel' otdela vodnykh problem Karel'skogo filiala AN SSSR (k 130-letiyu so dnya rozhdeniya S. V. Grigor'eva) [Founder of the Department of Water Problems of the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences (to the 130th anniversary of S. V. Grigoriev)]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 9. P. 130–133.

Grigor'ev S. V. Vodopady Karelii [Waterfalls of Karelia]. Petrozavodsk: Gosizdat KASSR, 1956. 76 p.

Grigor'ev S. V. Vnutrennie vody Karelii i ikh khozyaistvennoe ispol'zovanie [Inland waters of Karelia and their economic use]. Petrozavodsk: Gosizdat KASSR, 1961. 140 p.

Grigor'ev S. V. Vnutrennie vody Karelii i ikh ispol'zovanie (bibliograficheskii annotirovannyi ukazatel') [Inland waters of Karelia and their use (a bibliographic annotated list)]. Petrozavodsk: Karel. kn. izd-vo, 1964. 618 p.

Kirilina V. M., Svetov S. A., Medvedev P. V., Shekov V. A., Shekov K. V., Zakharchenko S. O., Kolesnikova N. V., Plotnikova V. S., Potakhin M. S., Nazarova L. E., Khuuskonen N. M., Shevchenko V. I. Prirodnyi i istoriko-kul'turnyi potentsial Respubliki Kareliya kak

Hudson B. Waterfalls resources for tourism // Ann. Tourism Res. 1998. Vol. 25(4). P. 958–973. doi: 10.1016/S0160-7383(98)00043-7

Hudson B. Waterfalls, tourism and landscape // Geography. 2006. Vol. 91(1). P. 3–12. doi: 10.1080/00167487.2006.12094145

Young R. W. Waterfalls: form and process // Zeitschrift für Geomorphologie Suppl. 1985. Vol. 55. P. 81–95.

Поступила в редакцию 04.02.2021

predposylka razvitiya regional'nogo turizma [Natural, historical, and cultural potential of the Republic of Karelia as a prerequisite for the development of regional tourism]. Petrozavodsk: PetrGU, 2016. 80 p.

Kuchko A. A., Aluferova N. V., Baibusinov Sh. Sh., Vakhrameeva T. I., Detchuev B. F., Lobanov V. P., Lobanova N. V., Makarikhin V. V., Pashkov A. M. Kareliya: putevoditel' [Karelia: a guidebook]. Petrozavodsk: Skandinaviya, 2011. 288 p.

Kutenkov A. P. Vodopad Kivach: spravochnik [Kivach waterfall: a reference book]. Petrozavodsk: Skandinaviya, 2018. 80 p.

Litvinenko A. V. K istorii gidroenergeticheskogo osvoeniya vodnykh ob'ektov Karelii [On the history of hydropower development of water bodies in Karelia]. Ekol. issled. prirodnikh vod Karelii [Ecol. studies of natural waters of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 21–27.

Lukashov A. D. Geomorfologicheskie usloviya [Geomorphological conditions]. Raznoobrazie bioty Karelii: usloviya formirovaniya, soobshchestva, vidy [Diversity of biota of Karelia: conditions of formation, communities, and species]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 13–19.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. A reference book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

Olonetskie vodopady Kivach, Por'-Porog i Girvas v opisaniyakh turistov [Olonets waterfalls Kivach, Por-Porog and Girvas in the descriptions of tourists]. Ed. N. S. Shaizhin. Petrozavodsk: Olonetskaya gub. tip., 1907. 58 p.

Potakhin M. S., Bogdanova M. S., Tolstikov A. V. Vodopady Karelii – perspektivnye ob'ekty turizma [Waterfalls of Karelia as perspective objects of tourism]. Geografiya: traditsii i innovatsii v nauke i obrazovanii [Geography: traditions and innovations in science and education]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena, 2014. P. 264–268.

Potakhin M. S., Bogdanova M. S., Tolstikov A. V., Potakhin S. B. Vodopady Severnogo Priladozh'ya kak ob'ekty prirodnogo i kul'turnogo naslediya [Waterfalls of Northern Ladoga area as objects of natural and cultural heritage]. Prirodnoe i kul'turnoe nasledie: mezhdistitsiplinarnye issledovaniya, sokhranenie i razvitie [Natural and cultural heritage: interdisciplinary research, conservation, and development]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena, 2015a. P. 138–142.

Potakhin M. S., Bogdanova M. S., Tolstikov A. V. Razrabotka informatsionno-spravочноi sistemy "Vodopady Karelii" [Development of the information referral system "Waterfalls of Karelia"]. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya* [Geography: development of science and education]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertse-na, 2015b. P. 583–586.

Potakhin M. S., Khuuskonen N. M., Potakhin S. B. Razrabotka prirodovedcheskoi ekskursii "Vodopady Severnogo Priladozh'ya" [Development of a natural history excursion "Waterfalls of Northern Ladoga area"]. *Turizm i obrazovanie: issledovaniya i proekty* [Tourism and education: research and projects]. Petrozavodsk: PetrGU, 2017. P. 87–90.

Potakhin M. S., Khuuskonen N. M., Potakhin S. B., Zakharchenko S. O. Razrabotka prirodovedcheskoi ekskursii "Vodopady Severnogo Priladozh'ya" [Development of a natural history excursion "Waterfalls

of the Northern Ladoga area"]. Petrozavodsk: PetrGU, 2018. 49 p.

Ufimtsev G. F. Vodopady [Waterfalls]. *Zemlya i vse-lennaya* [Earth and Universe]. 2014. No. 1. P. 94–105.

Goudie A. S. Waterfalls: forms, distribution, processes and rates of recession. *Quaestiones Geographicae*. 2020. Vol. 39(1). P. 59–77. doi: 10.2478/quageo-2020-0005

Hudson B. Waterfalls resources for tourism. *Ann. Tourism Res.* 1998. Vol. 25(4). P. 958–973. doi: 10.1016/S0160-7383(98)00043-7

Hudson B. Waterfalls, tourism and landscape. *Geography*. 2006. Vol. 91(1). P. 3–12. doi: 10.1080/00167487.2006.12094145

Young R. W. Waterfalls: form and process. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* 1985. Vol. 55. P. 81–95.

Received February 04, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Потехин Максим Сергеевич

старший научный сотрудник группы исследований донных отложений, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: mpotakhin@mail.ru
тел.: +79212267941

Толстиков Алексей Владимирович

руководитель лаб. географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник лаб. географии и гидрологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: mari-mb@mail.ru

Георгиев Андрей Павлович

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: a-georgiev@mail.ru

Георгиевский Игорь Юрьевич

фотограф Редакционно-издательского отдела
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: geophoto@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Potakhin, Maksim

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mpotakhin@mail.ru

Tolstikov, Alexey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Bogdanova, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mari-mb@mail.ru

Georgiev, Andrey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: a-georgiev@mail.ru

Georgievsky, Igor

Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: geophoto@mail.ru

Потехин Сергей Борисович

профессор кафедры наук о Земле и геотехнологий, д. г. н.
Институт лесных, горных и строительных наук
Петрозаводского государственного университета
пр. Ленина, 29, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185035
эл. почта: spotakhin@yandex.ru

Potakhin, Sergey

Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences,
Petrozavodsk State University
29 Lenin St., 185035, Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: spotakhin@yandex.ru

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 551.465

БЕЛОМОРСКИЙ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗ

**А. Н. Новигатский, В. П. Шевченко, А. А. Клювиткин,
М. Д. Кравчишина, Н. В. Политова**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Изучено морское осадконакопление с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. На основе многолетних исследований небольшого моря удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях субарктической и арктической зон Северо-Запада России. Изучена месячная, сезонная, многолетняя динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества. Представлена морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м² дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

Ключевые слова: Белое море; седиментогенез; седиментационные ловушки; вертикальные потоки осадочного вещества; донные осадки.

**A. N. Novigatsky, V. P. Shevchenko, A. A. Klyuvitkin, M. D. Kravchishina,
N. V. Politova. SEDIMENTOGENESIS IN THE WHITE SEA**

Marine sedimentation was studied using dispersed sedimentary material of the water column in sedimentation traps in comparison with the surface layer of bottom sediments. Long-term studies of a small sea have enabled identification of new regularities in the sedimentary process in the Subarctic and Arctic zones of Northwest Russia. The monthly, seasonal, and long-term dynamics of the main components of the streams of dispersed sedimentary matter were studied. The chronology of the marine stage of sedimentation of the main components of dispersed sedimentary matter is presented; it is shown that the biogenic component of the flux decreases by an order of magnitude upon transition from dispersed forms to concentrated ones. The average values of the vertical fluxes were calculated: the total, and by the contributions of the main biogenic and terrigenous components per 1 m² of the bottom and over the entire deep-water area of the White Sea.

Keywords: White Sea; sedimentogenesis; sedimentation traps; vertical flux of sediment; bottom sediments.

Введение

Рассеянная форма осадочного вещества широко распространена в природе, но малоизучена. Эта форма дисперсного осадочного вещества существует практически во всех геосферах – аэрозоли в атмосфере, гидрозоли в морской и пресной воде, криозоли во льдах и снеге [Lisitzin, 2010]. Она существует и в местах подводных извержений – гидротермальной деятельности срединно-океанических хребтов (дымы «курильщиков»), в незначительных количествах поступает из космоса (космическая пыль). Важную роль в образовании золь играют организмы-продуценты (диатомовые, кокколитофориды и др.), которые создают биогенную взвесь, и организмы-фильтраторы, которые используют эту тонкую взвесь и мелкий биогенный детрит для питания (зоопланктон и бентос) [Lisitzin, 2004]. Рассеянные формы осадочного вещества на континентах связаны с процессами физического и химического выветривания горных пород и в значительной мере – с макроорганизмами и растительностью (споры и пыльца при цветении растений, микрочастицы при распаде растительного вещества). Многие важные особенности образования, переноса (транспортировки) осадочного вещества в рассеянной и растворенной его формах до настоящего времени почти не изучены. Изучались в основном только их концентраты: донные осадки океанов, морей, озер [Rachold et al., 2004; Stein, 2008; Romankevich et al., 2009]. Водная взвесь – единственный источник формирования донных осадков, главный источник пищи глубоководных организмов. Общей особенностью осадочного материала всех геосфер является незначительное содержание в среде и размеры. Как и бактерии (биогенная часть взвеси), осадочный материал практически не различается невооруженным глазом. Характерны также его подвижность, очень широкое региональное и глобальное распространение, тонкость частиц (в основной части 1–100 мкм), тесная связь с условиями среды, взаимодействие по путям переноса [Lisitzin, 2004, 2010].

Рассеянные формы осадочного вещества – главный источник пелагических донных осадков; они обнаружены во всех геосферах и перемещаются в соответствии с динамикой среды. Принципиально новые данные о процессах осадкообразования получены прямыми методами определения вертикальных (и наклонных) потоков осадочного вещества (седиментационные ловушки, изотопные методы и др.) [Lein et al., 2012; Lisitzin et al., 2014, 2015a, b, 2017; No-

vigatsky et al., 2020]. Для седиментологии наибольший интерес представляет метод седиментационных ловушек [Honjo, Doherty, 1988; Wefer, Fischer, 1991; Lukashin et al., 2011]. Это конусы или цилиндры, в нижней части которых установлены приемные флаконы, собирающие рассеянный осадочный материал. Смена флаконов производится микропроцессором, т. е. экспозиции улавливания вещества могут устанавливаться от одних суток до месяцев, сезонов, лет. Мы ведем отбор вещества на разных глубинах обычно с экспозицией 1 месяц и сменной станций один раз в год. Таким образом удастся получить непрерывный во времени ряд проб с месячными экспозициями (дифференциальные потоки) и годовыми экспозициями (интегральные потоки) на Белом море, в Арктике и разных природных зонах океанов. Опорные станции, снабженные не только ловушками, но и измерителями течений, прозрачномерами, самописцами, установленными на разных глубинах на вертикальном тросе с якорем, называют автоматическими глубинными седиментационными обсерваториями (АГОС) [Lisitzin et al., 2014; Novigatsky et al., 2018a, b].

Северный Ледовитый океан – океанический бассейн с сильно выраженной сезонностью осадконакопления. Такие параметры, как площадь развития морских льдов, твердый и жидкий сток рек, абразия берегов, первичная продукция, температуры поверхностной водной массы и приводного слоя атмосферы, демонстрируют ярко выраженную сезонность. Последние годы мы проводили детальные исследования по взаимодействию рассеянного и растворенного вещества на региональном и локальном уровнях в характерном водоеме арктической и субарктической зон – в Белом море. Большую часть года это море покрыто дрейфующими льдами, а придонные его воды имеют температуру $-1,4^{\circ}\text{C}$ круглый год, т. е. здесь обстановка соответствует условиям зон ледовой седиментации [Lisitzin, 2002; Levitan, 2015].

Скорости седиментации донных осадков Мирового океана меняются в широких пределах от менее 1 до 1000 и более мм/год. На континентальных окраинах Северного Ледовитого океана (СЛО) встречаются значения порядка 10 мм/год (в депоцентрах зон смешения речных и морских вод, пр. Фрама и некоторых фьордах), нередко нулевые и даже отрицательные значения в зонах донной эрозии (участки дна Белого, Баренцева, Карского и других морей) при средней скорости осадконакопления в пелагиали СЛО 0,01 мм/год [Rachold et al., 2004; Stein, 2008; Levitan, 2015].

Таким образом, океан – главный уловитель рассеянного осадочного вещества всех геосфер, внешних и внутренних, т. е. это глобальный самописец геосфер планеты (процессов, событий на континентах и в водах океанов). Взаимодействие геосфер особенно активно идет на двух батиметрических уровнях: на поверхности для внешних геосфер и в придонном слое – верхней части осадочной толщи. К этим двум видам осадочного материала в морях и океанах добавляется еще рассеянное вещество, образующееся в море, – биогенное ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + \text{C}_{\text{орг}}$) [Lisitzin, 2004; Wassmann et al., 2004]. В процессе смешения осадочного вещества всех геосфер (его растворенных и взвешенных форм) происходит не только образование, но и преобразование этих видов осадочного вещества, их неоднократное взаимодействие, смешение по мере осаждения, так что в донные осадки попадает осадочный материал, прошедший различные превращения на пути от поверхности до дна океана [Lisitzin, 2010]. Все эти превращения удастся изучать в пробах взвеси от поверхности до дна, а затем в донных осадках.

Материалы и методы

В рамках программы ИО РАН «Система Белого моря» впервые в Белом море в течение 15 лет проводили непрерывные прямые исследования осадочных процессов не только в донных осадках, но и в толще вод посредством мембранной ультрафильтрации взвеси, а также с помощью АГОС с ежемесячным прямым количественным определением вертикальных потоков и непрерывным отбором вещества с разных глубин круглый год. Это позволяет получить прямые данные о количественной концентрации (мг/л), скорости осаждения (мм/год) и вертикальных потоках (мг/м²/сут), т. е. абсолютных массах рассеянного осадочного вещества в придонном слое вод и верхнем слое донных осадков, его изменениях в ходе осаждения от поверхности до дна, причем непрерывно во времени [Lisitzin et al., 2014, 2015a, b; Novigatsky et al., 2018b, 2020].

Метод седиментологических обсерваторий мы совмещаем обычно с непрерывными спутниковыми наблюдениями для поверхностного слоя вод, рейсовыми океанологическими и геологическими исследованиями донных осадков (пробы из мультикорера) на станциях (рис. 1). Такие исследования методом АГОС с непрерывным изучением рассеянного вещества в толще вод Белого моря (0–300 м) в сопоставлении с донными осадками удалось вы-

полнить в 2000–2014 гг. на мегаполигоне Белое море (рис. 1).

Другой независимый метод количественного изучения осадочного вещества в толще вод (концентрация, мг/л) – метод мембранной ультрафильтрации (выделение частиц крупнее 0,45 мкм). Этот метод дает картину распределения вещества только для момента работ на станции (одномоментный). Обычно дискретный отбор проб батометрами предваряют непрерывным вертикальным зондированием прозрачности и других параметров, что открывает возможность отбора проб не формально (по горизонтам), а в наиболее важных местах. Для самого верхнего слоя (0–5 м) используют также спутниковые данные (сканер MODIS-Aqua) для всего времени работ спутников, т. е. круглогодичные [Kravchishina et al., 2015, 2018].

Таким образом, сочетание спутниковых наблюдений с верификацией и контролем прямыми дискретными определениями содержания взвешенного вещества на станциях позволяет получить картину распределения взвеси (мг/л) для всего поверхностного слоя на момент экспедиционных исследований и распространить это для взвешенного осадочного вещества и его биологической части (по хлорофиллу) уже по спутниковым данным на большую часть года.

Осаждающийся осадочный материал состоит в основном из биогенных и литогенных компонентов. Биогенные компоненты представлены органическим веществом (ОВ), карбонатным материалом, биогенным опалом; литогенные – обломочными и глинистыми минералами, реже вулканогенными пеплами. Индикаторы этих компонентов для ОВ – $\text{C}_{\text{орг}}$ ($\text{C}_{\text{орг}} \cdot 2 = \text{ОВ}$) [Lukashin et al., 2000], для кремнистых панцирей – $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, для карбонатных – CaCO_3 , для литогенного материала – Al, $\text{Si}_{\text{вал}}$ [Lukashin et al., 2003]. Скорости современного осадконакопления в Белом море в верхнем слое осадков (0–20 см) определяли с помощью радионуклидного анализа (^{137}Cs , ^{210}Pb) [Aliev et al., 2007].

Результаты и обсуждение

В настоящей работе описан новый подход к пониманию современных процессов седиментации в морях и океанах с использованием разработанного в ИО РАН метода АГОС. Этот метод позволяет изучать рассеянное осадочное вещество не только в обычных для океанологии трех измерениях (широта, долгота, глубина), но и во времени (от месяцев и сезонов до десятков лет), в том числе при переходе осадочного вещества из рассеянной (взвесь)

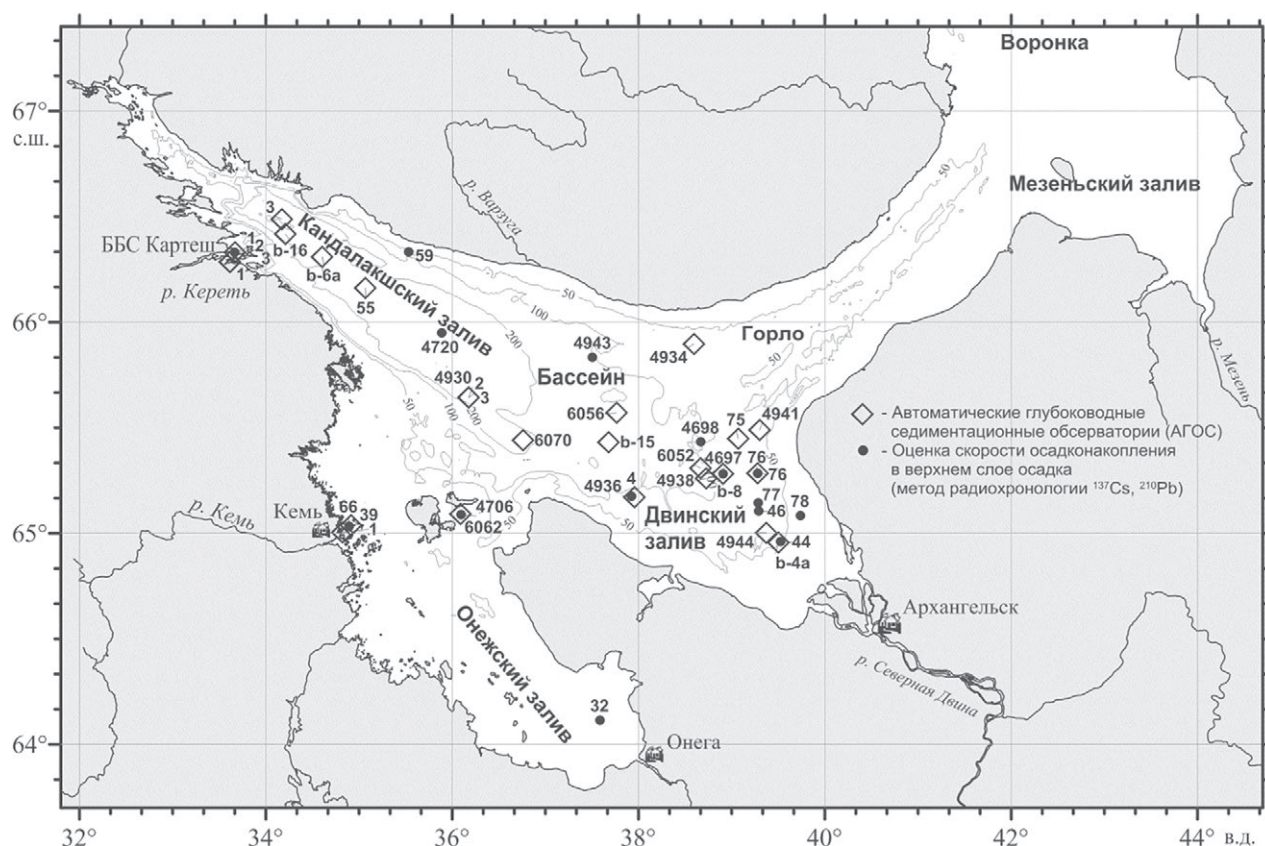


Рис. 1. Положение автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС) в Белом море с седиментационными ловушками и измерителями течений с параллельным изучением взвеси и донных осадков с оценкой скорости седиментации по верхнему слою донных осадков (метод радиохронологии ^{137}Cs , ^{210}Pb) [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 1. Position of automatic deep-water sedimentation observatories (ADOS) in the White Sea with sedimentation traps and current meters with a parallel study of suspended matter and bottom sediments with an estimate of the sedimentation rate along the upper layer of bottom sediments (^{137}Cs , ^{210}Pb radio chronology method) [Novigatsky et al., 2020]

в концентрированную форму (донные осадки) с резким изменением реологии [Novigatsky et al., 2018b, 2020].

Сезонная изменчивость месячных значений потоков осадочного вещества и среднемесячных значений концентрации взвеси

После весеннего таяния льда и вскрытия рек в моря Арктики начинают поступать основные порции осадочного материала с площади речного водосбора [Gordeev, 2006; Kravchishina et al., 2010]. Параллельно с этим процессом под снежно-ледовым покровом и у кромки льда вследствие высокой солнечной активности в сочетании с поступлением растворенных биогенных элементов речного стока и талого морского льда, аккумулирующего аэрозольный и другой осадочный материал всю зиму, происходит весенняя вспышка цветения фитопланктона [Ilyash et al., 2011, 2013] и одновре-

менно бурное развитие бактерий (максимум зоопланктона следует немного позже). В морях Арктики, а также и в Белом море, в связи с этим происходит резкий сезонный скачок концентрации взвеси [Kravchishina et al., 2015] и, как следствие, увеличение в несколько раз значений вертикальных потоков осадочного вещества с поверхности на дно моря (рис. 2).

На рис. 2 представлены месячные значения вертикальных потоков, полученные нами с 2000 г. Резкие максимумы потоков приурочены к областям эстуариев и заливов, где преобладающее влияние на поставку осадочного материала имеет материковый сток [Shevchenko et al., 2005, 2010]. Своего максимума потоки осадочного вещества достигают в июне, превышая значение $1000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ (ст. 3 – Канда-лакшский залив, ст. 75 – Двинский залив).

Летняя межень (середина июля – август) в Белом море характеризуется относительно низкими значениями потоков, которые в среднем составляли не более $200 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ (ст. 75,

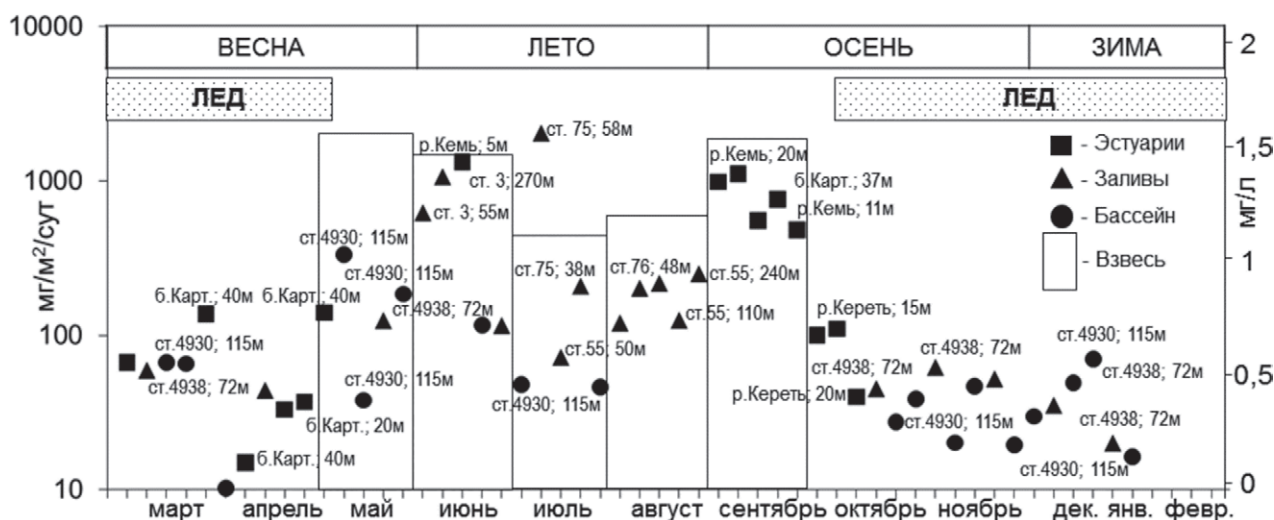


Рис. 2. Сезонная динамика месячных значений потоков осадочного вещества ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$) и среднемесячных значений концентрации взвеси ($\text{мг}/\text{л}$) в самой верхней части делящего слоя, по данным спутникового сканера MODIS-Aqua [Kravchishina et al., 2015], в Белом море [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 2. Seasonal dynamics of monthly values of sedimentary matter fluxes ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$) and monthly average values of suspension concentration (mg/L) in the uppermost part of the active layer according to the MODIS-Aqua satellite scanner [Kravchishina et al., 2015] in the White Sea [Novigatsky et al., 2020]

76 – Двинский залив; ст. 55 – Кандалакшский залив; рис. 2).

В конце летнего сезона – начале осени структура планктонного сообщества снова перестраивается, идет бурный рост мезопланктона, эврифагов и крупного зоопланктона [Pertzova, Kosobokova, 2000]. Осенние паводки также вносят существенный вклад в увеличение концентраций взвеси, что напрямую отражается на величинах потока и составе осадочного вещества (рис. 2). На это в первую очередь реагируют эстуарные области, где значения потоков осадочного вещества достигают $1000 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ (р. Кемь, биологическая станция Картеш).

В конце осени солнечная активность снижается, планктонные сообщества мигрируют на большие глубины (зимовка) [Pertzova, Kosobokova, 2000], речной сток перестраивается на режим зимней межени, начинается ледостав. Концентрация взвеси в этот период в арктических морях незначительна, соответственно, минимальны и потоки осадочного вещества (рис. 2).

Относительное увеличение потоков осадочного вещества можно наблюдать в декабре (рис. 2); вероятно, это связано со сменой гидрологического режима Белого моря и, как следствие, разрушением пикноклина. По данным М. Д. Кравчишиной [Kravchishina et al., 2015], скачок плотности (пикноклин) аккумулирует значительное количество взвеси. При замерзании льдов отжимаются рассолы, которые опускаются на глубину, это явление отражается в относительно повышенных величинах потока

взвешенного осадочного вещества в декабре, что мы подробно описали в [Lisitzin et al., 2015b]. Зимние подледные вертикальные потоки осадочного вещества характеризуются самыми низкими значениями, которые не превышают $70 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ (ст. 4930 – Бассейн; рис. 2). Это связано с ослаблением солнечной радиации и полным ее прекращением в полярную ночь.

Таким образом, наблюдается ярко выраженная сезонная и месячная изменчивость потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море – меняются в толще вод их количество, состав, свойства. Максимальные значения концентраций ($\text{мг}/\text{л}$) и потоков ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$) характерны для безледного весенне-летнего периода, минимальные свойственны зимнему периоду, когда море и питающий водосбор покрыты снежно-ледовым покровом, а речной и эоловый сток незначительны. При смене гидрометеорологического режима возникают сезонные изменения потоков рассеянного осадочного вещества, повторяющиеся из года в год (повышенное содержание потоков в декабре, ледовая разгрузка в апреле, майская вспышка цветения фитопланктона и половодье). Месячные, сезонные и годовые потоки рассеянного осадочного вещества во времени могут различаться между собой в несколько раз, особенно в весенний сезон, когда существенное влияние на величину потока оказывает ледовый режим акватории: ковровая снежно-ледовая разгрузка осадочного вещества – криозоля, речной сток, а также абразия, цветение фитопланкто-

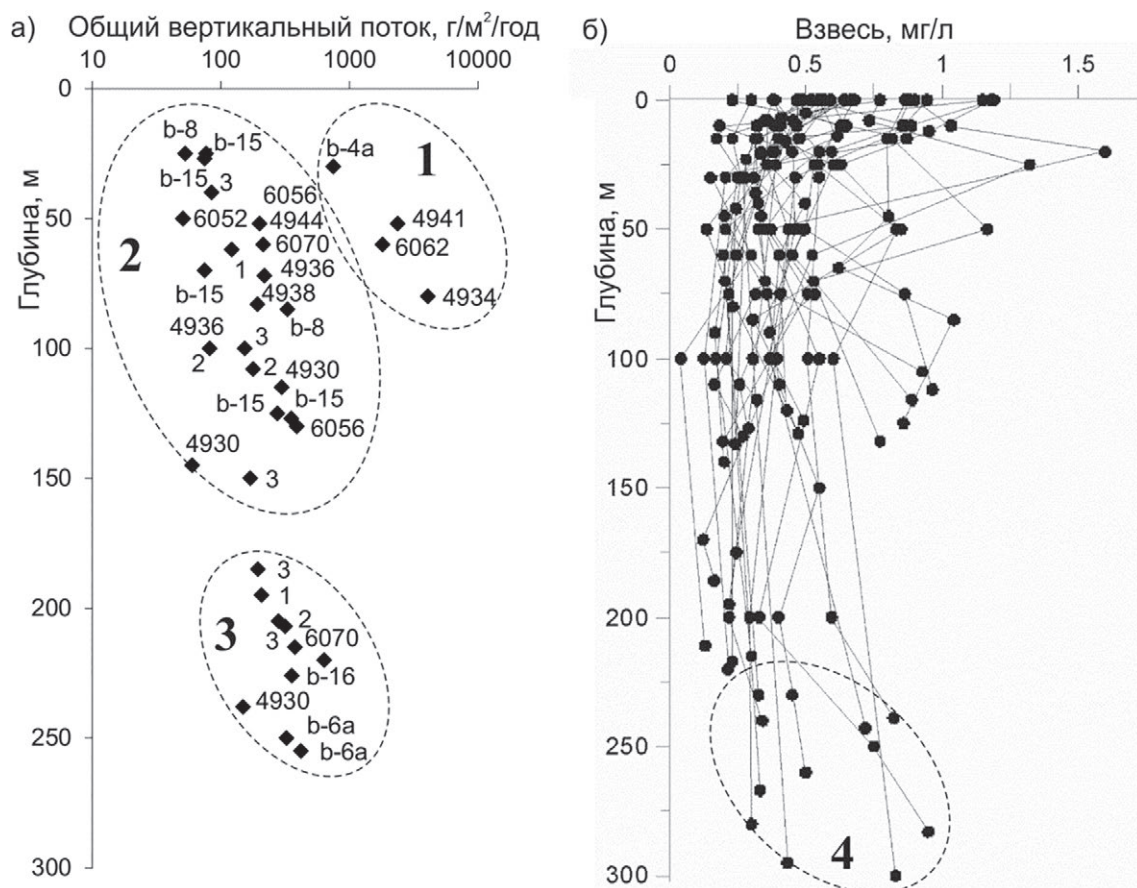


Рис. 3. Соотношение величин (а) интегральных вертикальных потоков ($\text{г/м}^2/\text{год}$) и (б) взвеси (мг/л) в Белом море с глубиной (0–300 м): 1 – область высоких и сверхвысоких величин потока; 2 – область величин потока под пикноклином; 3 – область придонных величин потока; 4 – повышенные значения взвеси в придонном нефелоидном слое [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 3. Ratio of values (a) integral vertical fluxes ($\text{g/m}^2/\text{year}$) and (б) suspended particulate matter (mg/L) in the White Sea with a depth (0–300 m): 1 – region of high and ultrahigh fluxes values; 2 – area of fluxes values under the pycnocline; 3 – area of bottom fluxes values; 4 – increased values of suspended matter in the bottom nepheloid layer [Novigatsky et al., 2020]

на. Потоки осадочного материала на дно напрямую зависят от взаимодействия вещества, поступающего из внешних геосфер.

Годовые интегральные потоки рассеянного осадочного вещества

В ходе работ мы выделили два структурных фронта в Белом море: Северный, где через Горло поступают воды из Баренцева моря и уходят из Белого моря (Северодвинское течение), т. е. это область смешения вод, и Южный фронт близ Соловецких островов [Lisitzin et al., 2014]. Указанные фронтальные зоны характеризуются повышенными по сравнению с другими частями моря концентрациями и потоками рассеянного вещества (взвеси). Здесь, кроме того, высокая интенсивность приливо-отливных течений. Именно здесь проявлены макси-

мальные для моря среднегодовые значения потоков на трех станциях (6062, 4934, 4941): 4082–1814, в среднем $2758 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (рис. 3, а).

Другие части Белого моря (Бассейн, Двинский, Кандакшский заливы) характеризуются более низкой приливо-отливной энергией и более низкими концентрациями и потоками рассеянного осадочного вещества. Средняя величина потоков осадочного вещества в море (за исключением аномалий двух фронтов) – $234 \text{ г/м}^2/\text{год}$, т. е. на порядок меньше, чем во фронтальных зонах. Минимальные потоки обнаружены в центральной части моря в Бассейне – $51 \text{ г/м}^2/\text{год}$, а средние многолетние для глубоководной части Белого моря – $213 \text{ г/м}^2/\text{год}$, что близко к другим определениям для Арктики [Fahl, Nöthig, 2007; Lalande et al., 2014].

Повышены потоки осадочного вещества в заливах Белого моря – Двинском и Канда-

лакшском, в особенности в областях их маргинальных фильтров (зоны смешения речных и морских вод) [Lisitzin et al., 2014, 2015b]. Так, средняя многолетняя величина потока для Двинского залива – 243 г/м²/год, а в Кандалакшском заливе – 367 г/м²/год для открытых их частей. Таким образом, маргинальные фильтры – это вторая область повышенных значений потоков осадочного вещества.

Третья область повышенных значений содержания взвеси и потоков – придонная (от поверхности дна до 100 м над дном, а иногда и больше). Здесь основную роль играют придонные течения, изученные на нескольких станциях на протяжении ряда лет. Главное значение для динамики в Белом море имеют полусуточные приливы с местными отклонениями, связанными с конфигурацией дна и берегов. При уменьшении глубины амплитуда приливно-отливных течений растет. Скорости возникающих течений бывают достаточными для размыва наилка (жидкий верхний слой осадков), что напрямую подтверждается наблюдениями за концентрацией взвеси и прозрачностью вод придонного слоя. Данные зондирования и мембранной фильтрации показали возникновение слоев и линз вод повышенной мутности (нефеллоидов) – четвертая область (рис. 3, б) [Lukashin et al., 2000, 2003].

Прямые измерения придонных течений в Бассейне показали доминанту восточного вектора с изменениями направления на обратное без вращения. В среднем для года результирующие течения составляют около 1,5 см/с с изменениями до 2–20 см/с [Novigatsky et al., 2018b]. Интересной также оказалась связь величин потоков с глубиной (рис. 3, а). Высокие значения отмечены над пикноклином и на пикноклине (рис. 3, а, область 1), они снижаются на шельфе (0–200 м) и вновь растут на склоне (рис. 3, а, область 3).

Впервые количественно изучены вертикальные потоки осадочного вещества во всей акватории Белого моря методом АГОС. Получены новейшие данные о ходе осадочного процесса в толще вод от поверхности моря до верхнего слоя донных осадков. Метод АГОС открывает новые возможности для океанологии, седиментологии, геохимии и биологии – непрерывные наблюдения во времени от суток до десятков лет.

Скорости современной седиментации и абсолютные массы

Полученные нами значения по ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs показывают скорости осадконакопления для всего Белого моря 0,4–4,2 мм/год. В пересчете

на абсолютные массы сухого осадка эти значения отвечают интервалу 93–1260 при среднем около 310 г/м²/год (табл. 1). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря 0,3–1,0 мм/год [Mityaev et al., 2012], в море Бофорта 1,4 мм/год [Bringué, Rochon, 2012] и другие определения по Арктике [Stein, 2008; Levitan, 2015].

Прямые количественные данные по потокам осадочного вещества в придонных горизонтах Белого моря, полученные с помощью седиментационных ловушек на обсерваториях АГОС за 15 лет, дали значения 149–1814 при среднем 335 г/м²/год (табл. 1).

Более низкие значения абсолютных масс верхнего слоя донных осадков в сравнении с придонными потоками (при их сравнении в сходных единицах), очевидно, связаны с деградацией органического вещества и всей биогенной триады во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке). Это подтверждается исследованиями по органическому веществу [Politova et al., 2016], где показано, что при длительном пребывании частиц в самом верхнем слое осадка происходит потребление органического углерода бентосом и бактериями (выедание), а также частичное растворение других компонентов биогенной триады (CaCO₃, SiO₂^{заморф}).

Наиболее высокие значения скоростей осадконакопления и потоков осадочного вещества выявлены на границе река-море (реки Северная Двина, Онега, Кемь), т. е. в маргинальных фильтрах рек, а также вдоль стокового течения р. Северной Двины в Двинском заливе (рис. 1). Кроме того, высокие скорости осадконакопления обнаружены в глубоководных участках Бассейна, Кандалакшского и Двинского заливов в областях депрессий дна (Кандалакшский грабен и др.), они связаны со сложными склоновыми процессами (мутявые потоки, гравититы и др.) на дне моря [Novigatsky et al., 2018b].

Более высокие значения придонных потоков осадочного вещества встречены на ст. 6062 (между о. Большой Соловецкий и о. Анзерский): они в несколько раз превышают скорости осадконакопления в этой области. Район испытывает интенсивную гидродинамическую нагрузку – полусуточные приливные циклы Белого моря, что выражается в доминировании латерального вектора переноса осадочного вещества над обычным вертикальным. Суммарный результирующий вектор скорости латерального движения придонных водных масс Белого моря в течение года в среднем состав-

Таблица 1. Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка в Белом море [Novigatsky et al., 2020]

Table 1. Bottom vertical fluxes of dispersed sedimentary matter and an estimate of the sedimentation rate in the upper sediment layer in the White Sea [Novigatsky et al., 2020]

Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества Bottom vertical fluxes of dispersed sedimentary matter					
Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Горизонт, м Horizon, m	Величина придонного потока, г/м ² /год Bottom fluxes values, g/m ² /year
b-16	66°34'	33°47'	236	226	357
b-4a	64°57'	39°31'	50	30	752
b-8	64°35'	39°01'	96	85	330
b-15	65°26'	37°40'	132	125	276
b-15	65°26'	37°40'	132	127	354
b-6a	66°09'	35°03'	267	250	325
b-6a	66°09'	35°03'	267	255	421
6056	65°34'	37°45'	139	130	390
6062	65°05'	36°05'	70	60	1814
6070	65°26'	36°45'	229	220	639
4930	65°38'	36°10'	255	238	149
2 (4930)	65°38'	36°09'	249	207	317
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	185	195
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	195	208
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	205	282
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	215	378
4944	65°00'	39°22'	67	52	201
4938	65°15'	38°43'	117	72	219
4936	65°10'	37°57'	97	83	193
Среднее геометрическое Geometric mean					335
Минимум Minimum					149
Максимум Maximum					1814
Стандартное отклонение Standard deviation					372
Оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка (метод радиохронологии ²¹⁰ Pb and ¹³⁷ Cs) Estimate of the sedimentation rate in the upper sediment layer (¹³⁷ Cs, ²¹⁰ Pb radio chronology method)					
Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Скорость осадконакопления, мм/год Sedimentation rate, mm/year	Абсолютные массы*, г/м ² /год Absolute masses*, g/m ² /year
4697	65°17'	38°55'	96	0,40	120
4698	65°25'	38°40'	107	0,79	237
4706	65°05'	36°06'	66	0,85	255
4720	65°57'	35°53'	290	2,2	660
32	64°07'	37°35'	16	2,7	810
78	65°05'	39°44'	32	4,2	1260
66	65°02'	34°53'	21	0,82	246
76	65°17'	39°16'	68	0,91	273
77	65°08'	39°17'	76	0,31	93
59	66°20'	35°32'	81	0,62	186

Окончание табл. 1
Table 1 (continued)

Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Скорость осадконакопления, мм/год Sedimentation rate, mm/year	Абсолютные массы*, г/м ² /год Absolute masses*, g/m ² /year
3	66°20'	33°40'	62	0,51	153
4943	65°50'	37°30'	116	0,69	207
44	64°58'	39°31'	54	2,6	780
46	65°06'	39°17'	73	1,1	330
4	65°10'	37°56'	88	1,7	510
Среднее геометрическое Geometric mean				1,0	310
Минимум Minimum				0,40	93
Максимум Maximum				4,2	1260
Стандартное отклонение Standard deviation				1,1	332

*При средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0,3 г/см³.

*With an average density of dry sediment (0–20 cm) 0.3 g/cm³.

ляет 1,5 см/с и не создает существенных препятствий для осаждения под действием силы тяжести [Novigatsky et al., 2018b]. Кроме того, на отдельных станциях выделяются участки быстрой и сверхбыстрой седиментации в устьевых (ст. b-4a) и склоновых (ст. 6070 и 3) областях.

Таким образом, удалось применить новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность инситу (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях донных осадков и на новом технологическом уровне проследить изменения природной среды и климата.

Динамика основных компонентов потока осадочного вещества

На рис. 4 представлен месячный и сезонный ход основных компонентов рассеянного осадочного вещества в Белом море. Отчетливо выделяется высокая доля литогенной части на протяжении года. Это характерная особенность внутриконтинентальных морей. Кроме того, литогенная составляющая потока существенно доминирует в зимний сезон, когда акватория покрыта снежно-ледовым покровом, значительно лимитирующим процессы морского фотосинтеза и, соответственно, биогенную составляющую потока.

Для биогенной части значимую долю в вертикальном потоке ОБ составляют планктонные водоросли, вклад которых может достигать 90 % [Ilyash et al., 2013]. К основным особенностям Белого моря, отрицательно влияющим на развитие карбонатных организмов, следует отнести отсутствие теплых течений, слабый водообмен с океаном, длительность ледового покрова, большой приток пресных вод и низкую первичную продукцию фитопланктона. В Белом море преобладают морские виды диатомовых (до 70 %) с кремнистым скелетом, пресноводные формы находятся в подчиненном положении и встречаются обычно только в заливах с речным стоком [Ilyash et al., 2011]. Своих максимальных значений биогенные компоненты потока достигают в безледный период (рис. 4), однако высокие значения ОБ встречаются и в зимние месяцы, что связано с поступлением обогащенных биогенными элементами баренцевоморских вод, а также зимней миграцией зоопланктона в придонные горизонты [Pertzova, Kosobokova, 2000].

Обращают на себя внимание лавинные скорости седиментации в весенне-летний сезон (рис. 4, а, б). Это явление типично для морей Арктики и обусловлено наложением нескольких процессов поступления осадочного вещества – таяние снежно-ледяного покрова, бурное цветение планктона, половодье [Lisitzin et al., 2015b].

На рис. 5 показана морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, где материал с месячной экспозицией (взвесь) получен

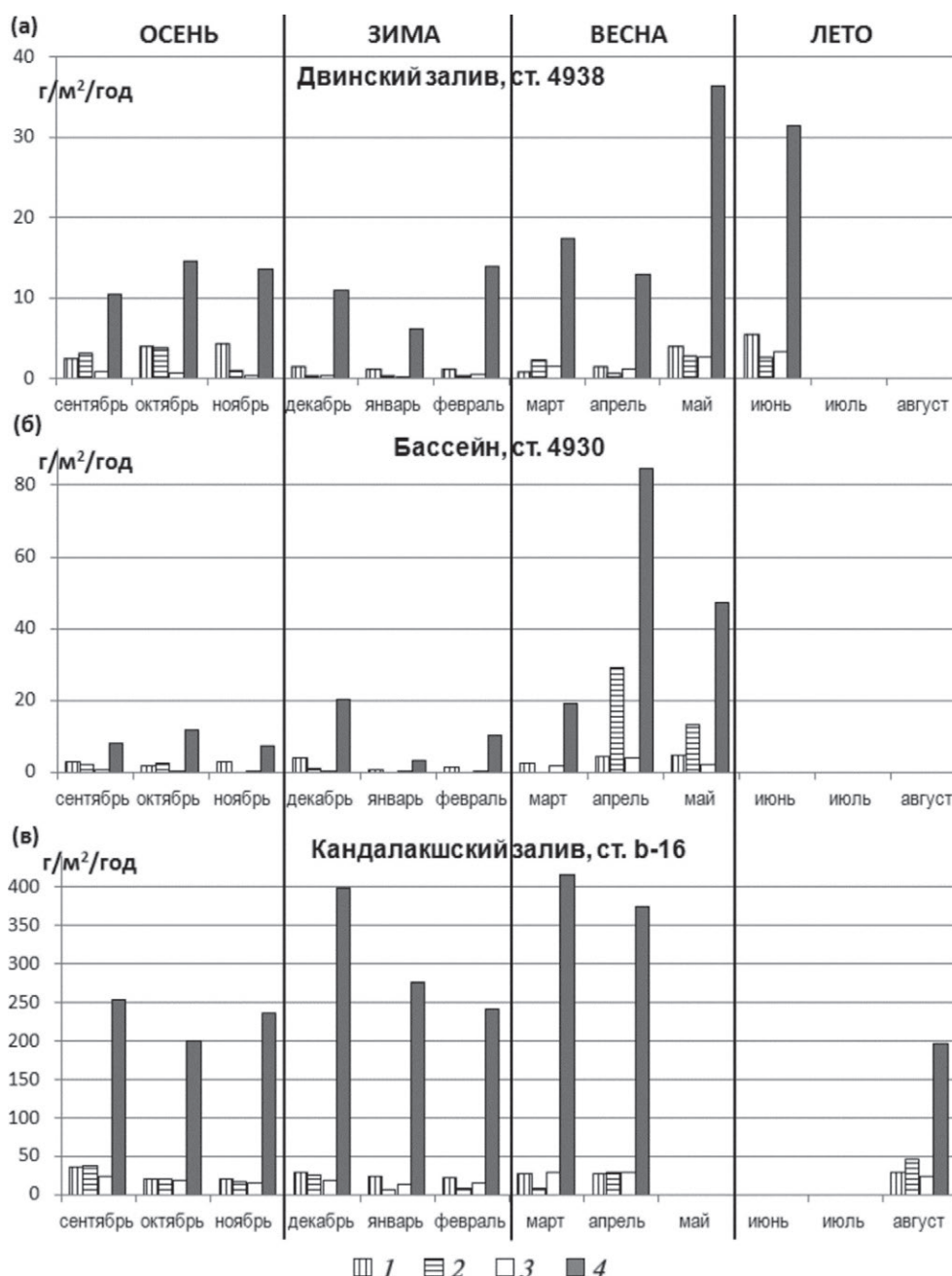


Рис. 4. Изменения главных компонентов вертикальных потоков ($\text{г/м}^2/\text{год}$) в толще вод Белого моря по месяцам и сезонам, полученные в разных частях акватории с помощью седиментационных ловушек в составе АГОС: (а) – Двинский зал. (ст. 4938, глубина 117 м, горизонт постановки 72 м); (б) – Бассейн (ст. 4930, глубина 255 м, горизонт постановки 145 м); (в) – Кандалакшский зал. (ст. b-16, глубина 236 м, горизонт постановки 226 м). 1 – органическое вещество (ОВ), 2 – $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, 3 – CaCO_3 , 4 – литогенная часть. Положение АГОС – см. рис. 1 [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 4. Changes in the main components of vertical fluxes ($\text{g/m}^2/\text{year}$) in the water column of the White Sea by months and seasons, obtained in different parts of the water area using sedimentation traps within the ADOS: (a) – Dvinsky Bay (station 4938, depth 117 m, setting horizon 72 m); (б) – Basin (station 4930, depth 255 m, setting horizon 145 m); (в) – Kandalaksha Bay (station b-16, depth 236 m, setting horizon 226 m). 1 – Organic matter, 2 – $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, 3 – CaCO_3 , 4 – lithogenic part. ADOS position – see Fig. 1 [Novigatsky et al., 2020]

во время судовых работ, материал с годовой экспозицией получен с помощью седиментационных ловушек в составе АГОС, а материал с многолетней экспозицией – прецизионным

отбором поверхностного слоя донных осадков мультикорером [Lisitzin et al., 2017]. В осадочном материале с годовой экспозицией отчетливо фиксируется уменьшение доли биогенной

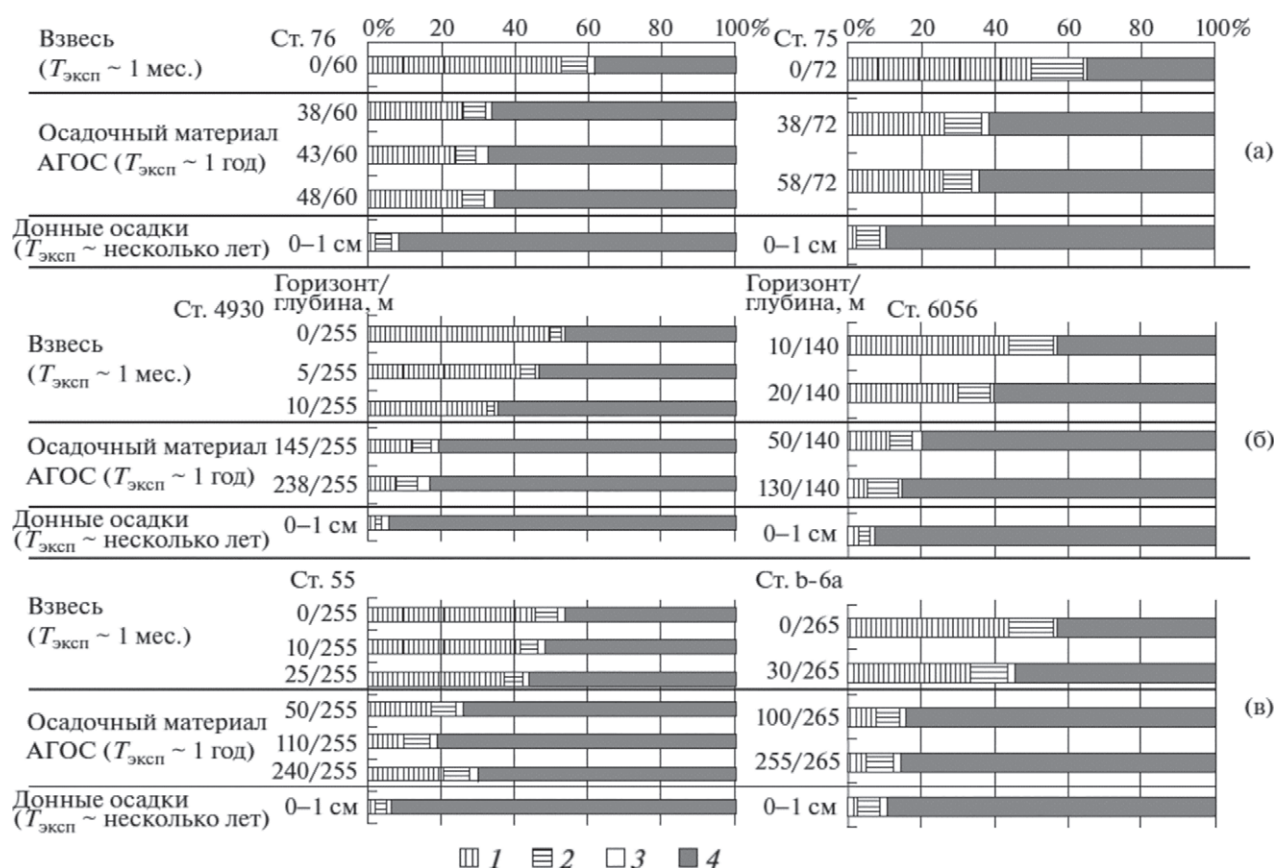


Рис. 5. Морская стадия седиментации основных компонентов (%) рассеянного осадочного вещества во времени, полученных методом АГОС: (а) – Двинский зал.; (б) – Бассейн; (в) – Кандалакшский зал. 1 – органическое вещество (ОВ), 2 – $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, 3 – CaCO_3 , 4 – литогенная часть [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 5. The marine stage of sedimentation of the main components (%) of dispersed sedimentary matter in time, obtained by the ADOS method: (a) – Dvinsky Bay; (б) – Basin; (в) – Kandalaksha Bay. 1 – Organic matter, 2 – $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, 3 – CaCO_3 , 4 – lithogenic part [Novigatsky et al., 2020]

составляющей в несколько раз по отношению к месячной экспозиции, а в материале с многолетней экспозицией доля биогенной составляющей уменьшается уже на порядок, поскольку основным источником энергии биохимических процессов при переходе рассеянных форм в концентрированные выступает ОВ, поступающее из взвеси, и восстановленные соединения, поступающие из осадков [Politova et al., 2016; Demina et al., 2018]. Кроме того, в этих сложных биогеохимических процессах активно участвуют микроорганизмы, которые отвечают за преобразование ОВ морской взвеси в ОВ донного осадка, особенно на начальном этапе осадкообразования [Lein et al., 2012].

По данным многолетних исследований АГОС нам удалось рассчитать поступление и среднее содержание основных компонентов потока рассеянного осадочного вещества в Белом море (табл. 2). В литературе встречены попытки оценить потоки углерода по первичной продукции [Berger, Primakov, 2007] и спутниковым данным

[Vetrov, Romankevich, 2014], однако прямых определений на разных горизонтах водного столба по всей акватории до сегодняшнего дня не проводили.

Таким образом, показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м^2 дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

Закключение

Впервые количественно изучены вертикальные потоки осадочного вещества во всей акватории Белого моря методом АГОС. Получены новейшие данные о ходе осадочного процесса в толще вод моря от поверхности моря до верхнего слоя донных осадков. Метод АГОС открывает новые возможности для океанологии,

Таблица 2. Среднее значение вертикального потока осадочного вещества: общее и по вкладам основных биогенных и литогенных компонентов на 1 м² дна (г/м²/год) и на всю площадь глубоководной части Белого моря (10⁶ т в год) [Novigatsky et al., 2020]

Table 2. Average value of the vertical fluxes of sedimentary matter: total and by the contributions of the main biogenic and lithogenic components per 1 m² of the bottom (g/m²/year) and for the entire area of the deep-water part of the White Sea (10⁶ tons per year) [Novigatsky et al., 2020]

Горизонт, м Horizon, m	Поток на 1 м ² поверхности дна, г/м ² /год Flux per 1 m ² of the bottom, g/m ² /year					Поток на глубоководную площадь моря (S = 50100 км ²), 10 ⁶ т в год Flux for the entire area of the deep-water part of the White Sea (S = 50100 km ²), 10 ⁶ tons per year				
	Поток валовый Total flux	ОВ Organic matter	SiO _{2 ам}	CaCO ₃	Литогенная часть Lithogenic part	Поток валовый Total flux	ОВ Organic matter	SiO _{2 ам}	CaCO ₃	Литогенная часть Lithogenic part
50–300	183	19	10	5	147	9	1	0.5	0.2	7.3

При среднем содержании компонентов в потоке (%): ОВ = 11; SiO_{2 ам} = 6; CaCO₃ = 3; литогенная часть = 80.
With an average content of components in the flux (%): ОВ = 11; SiO_{2 ам} = 6; CaCO₃ = 3; lithogenic part = 80.

седиментологии, геохимии и биологии – непрерывные наблюдения во времени от суток до десятков лет.

Наблюдается ярко выраженная сезонная и даже месячная изменчивость потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море – меняются в толще вод их количество, состав, свойства. Максимальные значения концентраций (мг/л) и потоков (мг/м²/сут) характерны для безледного весенне-летнего периода, минимальные свойственны зимнему периоду, когда море и питающий водосбор покрыты снежно-ледяным покровом, а речной и эоловый стоки незначительны. При смене гидрометеорологического режима возникают сезонные изменения потоков рассеянного осадочного вещества, повторяющиеся из года в год (повышенное содержание потоков в декабре, ледовая разгрузка в апреле, майская вспышка цветения фитопланктона и половодье).

Месячные, сезонные и годовые потоки рассеянного осадочного вещества во времени могут различаться между собой в несколько раз, особенно в весенний сезон, когда существенное влияние на величину потока оказывает ледовый режим акватории: ковровая снежно-ледовая разгрузка осадочного вещества – криозоля, речной сток, а также абразия, цветение фитопланктона. Потоки осадочного материала на дно напрямую зависят от взаимодействия вещества, поступающего из внешних геосфер.

Таким образом, на основе многолетних исследований небольшого моря Северного Ледовитого океана удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях субарктической и арктической зон. Изучена месячная, сезонная, многолетняя динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества. Представлена морская

стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени.

Показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м² дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

Удалось применить новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность инситу (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях донных осадков и на новом технологическом уровне проследивать изменения природной среды и климата.

Обработка материала из седиментационных ловушек выполнена при финансовой поддержке РНФ № 19-17-00234; обработка материала донных осадков выполнена при финансовой поддержке РНФ № 20-17-00157; обработка взвеси выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-05-00787; интерпретация полученных данных осуществлялась в рамках государственного задания ИО РАН на 2021 г. по теме № 0128-2021-0006.

Литература

Aliev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2007. Vol. 274(2). P. 315–321. doi: 10.1007/s10967-007-1117-x

- Berger V. Y., Primakov I. M. Assessment of primary production in the White Sea // *Russ. J. Mar. Biol.* 2007. Vol. 33, no. 1. P. 49–53. doi: 10.1134/S1063074007010051
- Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic) // *Mar. Geol.* 2012. Vol. 291. P. 83–96. doi: 10.1016/j.margeo.2011.11.004
- Demina L. L., Budko D. F., Novigatsky A. N., Alekseeva T. N., Kochenkova A. I. Occurrence forms of heavy metals in the bottom sediments of the White Sea // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea* / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 241–270. doi: 10.1007/978-2018-328
- Fahl K., Nöthig E. M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers.* 2007. Vol. 54, no. 8. P. 1256–1272. doi: 10.1016/j.dsr.2007.04.014
- Gordeev V. V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // *Geomorphology.* 2006. Vol. 80, no. 1. P. 94–104. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008
- Honjo S., Doherty K. W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application // *Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers.* 1988. Vol. 35, no. 1. P. 133–149. doi: 10.1016/0198-0149(88)90062-3
- Ilyash L. V., Radchenko I. G., Shevchenko V. P., Lisitzin A. P., Paka V. T., Burenkov V. I., Novigatsky A. N., Chul'tsova A. L., Pantyulin A. N. Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea in the late summer period with regard to the water structure and dynamics // *Oceanology.* 2011. Vol. 51, no. 6. P. 993–1003. doi: 10.1134/S000143701106004X
- Ilyash L. V., Radchenko I. G., Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P. Vertical flux of phytoplankton and particulate matter in the White Sea according to the long-term exposure of sediment traps // *Oceanology.* 2013. Vol. 53, no. 2. P. 192–199. doi: 10.1134/S0001437013020057
- Kravchishina M. D., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Novigatsky A. N., Dara O. M., Alekseeva T. N., Bobrov V. A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period // *Oceanology.* 2010. Vol. 50, no. 3. P. 365–385. doi: 10.1134/S0001437010030070
- Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A., Novigatsky A., Politova N., Shevchenko V., Lisitzin A. Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research // *Proceed. Intern. Association Hydrol. Sci.* 2015. Vol. 365. P. 35–41. doi: 10.5194/piahs-365-35-2015
- Kravchishina M. D., Lisitsyn A. P., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Politova N. V., Shevchenko V. P. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea* / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 13–48. doi: 10.1007/978-2018-353
- Lalande C., Nöthig E. M., Somavilla R., Bauerfeind E., Shevchenko V., Okolodkov Y. Variability in under-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean // *Global Biogeochem. Cycles.* 2014. Vol. 28, no. 5. P. 571–583. doi: 10.1002/2013GB004735
- Lein A. Y., Kravchishina M. D., Politova N. V., Savichev A. S., Veslopolova E. F., Mitskevich I. N., Ul'yanova N. V., Shevchenko V. P., Ivanov M. V. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data // *Lithology and Mineral Resources.* 2012. Vol. 47, no. 2. P. 99–128. doi: 10.1134/S0024490212020034
- Levitan M. A. Sedimentation rates in the Arctic Ocean during the last five marine isotope stages // *Oceanology.* 2015. Vol. 55, no. 3. P. 425–433. doi: 10.1134/S000143701503011X
- Lisitzin A. P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Springer, 2002. 563 p.
- Lisitzin A. P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean” // *Russ. Geol. and Geophysics.* 2004. Vol. 45, no. 1. P. 15–48.
- Lisitzin A. P. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes // *Russ. Geol. and Geophysics.* 2010. Vol. 51, no. 1. P. 12–47. doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.002
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Filippov A. S., Politova N. V. Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study // *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 456, no. 1. P. 635–639. doi: 10.1134/S1028334X14050353
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Aliev R. A., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D. Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea basin of the Arctic Ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2015a. Vol. 465, no. 2. P. 1253–1256. doi: 10.1134/S1028334X1512003X
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A. Seasonal variation of fluxes of dispersed sedimentary matter in the White Sea (Arctic ocean basin) // *Dokl. Earth Sci.* 2015b. Vol. 465, no. 1. P. 1182–1186. doi: 10.1134/S1028334X15110112
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White Sea // *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 472, no. 2. P. 252–255. doi: 10.1134/S1028334X17020295
- Lukashin V. N., Kosobokova K. N., Shevchenko V. P., Shapiro G. I., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Pantyulin A. N., Pertzova N. M., Deev M. G., Solov'ev K. A., Prego R., Latche L. Results of multidisciplinary oceanographic studies in the White Sea in June 2000 // *Oceanology.* 2003. Vol. 43, no. 2. P. 224–239.
- Lukashin V. N., Isaeva A. B., Rat'kova T. N., Prego R. Particulate matter and vertical particle fluxes in the White Sea // *Oceanology.* 2003. Vol. 43. P. 159–172.
- Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisitzin A. P., Novigatsky A. N. The MSL-110 small sediment trap // *Oceanology.* 2011. Vol. 51, no. 4. P. 699–703. doi: 10.1134/S0001437011040126
- Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Druzhkova E. I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents

and White Seas // *Oceanology*. 2012. Vol. 52, no. 1. P. 112–121. doi: 10.1134/S0001437012010158

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Klyuvitkin A. A., Shevchenko V. P., Kravchishina M. D., Politova N. V. Vertical fluxes of suspended sedimentary matter in Arctic sedimentogenesis of intracontinental seas // *Dokl. Earth Sci.* 2018a. Vol. 479, no. 1. P. 384–389. doi: 10.1134/S1028334X18030200

Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A., Lisitsyn A. P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea* / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018b. P. 49–66. doi: 10.1007/698_2018_278

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical fluxes of suspended particulate matter and absolute masses of bottom sediments // *Oceanology*. 2020. Vol. 60, no. 3. P. 372–383. doi: 10.1134/S0001437020030078

Pertsova N. M., Kosobokova K. N. Zooplankton of the White Sea. History of investigations and the present state of knowledge – a review // *Berichte zur Polarforschung*. 2000. Vol. 359. P. 23–29.

Politova N. V., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Ul'yanova N. V., Chul'tsova A. L., Kravchishina M. D., Pavlova G. A., Lein A. Yu. Early diagenesis in recent bottom sediments of the Dvina Bay (White Sea) // *Oceanology*. 2016. Vol. 56, no. 5. P. 702–713. doi: 10.1134/S0001437016050106

Rachold V., Eicken H., Gordeev V. V., Grigoriev M. N., Hubberten H.-W., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Schirmermeister L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* / Eds. R. Stein, R. W. Macdonald. Berlin: Springer, 2004. P. 33–41. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8_2

References

Aliiev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2007. Vol. 274(2). P. 315–321. doi: 10.1007/s10967-007-1117-x

Berger V. Y., Primakov I. M. Assessment of primary production in the White Sea. *Russ. J. Mar. Biol.* 2007. Vol. 33, no. 1. P. 49–53. doi: 10.1134/S1063074007010051

Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic). *Mar. Geol.* 2012. Vol. 291. P. 83–96. doi: 10.1016/j.margeo.2011.11.004

Demina L. L., Budko D. F., Novigatsky A. N., Alekseeva T. N., Kochenkova A. I. Occurrence forms of heavy metals in the bottom sediments of the White Sea. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 241–270. doi: 10.1007/698_2018_328

Fahl K., Nöthig E. M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic

Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresyepkin V. I. Organic matter of the World Ocean // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 299–307. doi: 10.1016/j.rgg.2009.03.013

Shevchenko V. R., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alekseeva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'kova T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S., Filippov A. S., Lisitsyn A. P., Bobrov V. A., Bogunov A. Yu., Zaverina N. N., Zolotykh E. O., Isaeva A. B., Kokryatskaya N. M., Korobov V. B., Kravchishina M. D., Novigatsky A. N., Politova N. V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea Region) // *Dokl. Earth Sci.* 2010. Vol. 430, no. 2. P. 228–234. doi: 10.1134/S1028334X10020182

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. Vol. 2. 592 p.

Vetrov A. A., Romankevich E. A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012 // *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 454, no. 1. P. 44–46. doi: 10.1134/S0001437011020196

Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.-M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer, 2004. P. 101–138. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8_5

Wefer G., Fischer G. Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data // *Marine Chem.* 1991. Vol. 35, no. 1–4. P. 597–613. doi: 10.1016/S0304-4203(09)90045-7

Поступила в редакцию 10.02.2021

Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport. *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2007. Vol. 54, no. 8. P. 1256–1272. doi: 10.1016/j.dsr.2007.04.014

Gordeev V. V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Geomorphology*. 2006. Vol. 80, no. 1. P. 94–104. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008

Honjo S., Doherty K. W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application. *Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1988. Vol. 35, no. 1. P. 133–149. doi: 10.1016/0198-0149(88)90062-3

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Shevchenko V. P., Lisitzin A. P., Paka V. T., Burenkov V. I., Novigatsky A. N., Chul'tsova A. L., Pantyulin A. N. Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea in the late summer period with regard to the water structure and dynamics. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 6. P. 993–1003. doi: 10.1134/S000143701106004X

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P. Vertical flux of phytoplankton and particulate matter in the White Sea according

to the long-term exposure of sediment traps. *Oceanology*. 2013. Vol. 53, no. 2. P. 192–199. doi: 10.1134/S0001437013020057

Kravchishina M. D., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Novigatsky A. N., Dara O. M., Alekseeva T. N., Bobrov V. A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period. *Oceanology*. 2010. Vol. 50, no. 3. P. 365–385. doi: 10.1134/S0001437010030070

Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A., Novigatsky A., Politova N., Shevchenko V., Lisitzin A. Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research. *Proceed. Intern. Association Hydrol. Sci.* 2015. Vol. 365. P. 35–41. doi: 10.5194/piahs-365-35-2015

Kravchishina M. D., Lisitsyn A. P., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Politova N. V., Shevchenko V. P. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 13–48. doi: 10.1007/698_2018_353

Lalande C., Nöthig E. M., Somavilla R., Bauerfeind E., Shevchenko V., Okolodkov Y. Variability in under-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*. 2014. Vol. 28, no. 5. P. 571–583. doi: 10.1002/2013GB004735

Lein A. Y., Kravchishina M. D., Politova N. V., Savichev A. S., Veslopolova E. F., Mitskevich I. N., Ul'yanova N. V., Shevchenko V. P., Ivanov M. V. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data. *Lithology and Mineral Resources*. 2012. Vol. 47, no. 2. P. 99–128. doi: 10.1134/S0024490212020034

Levitan M. A. Sedimentation rates in the Arctic Ocean during the last five marine isotope stages. *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 3. P. 425–433. doi: 10.1134/S000143701503011X

Lisitzin A. P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.

Lisitzin A. P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean”. *Russian Geology and Geophysics*. 2004. Vol. 45, no. 1. P. 15–48.

Lisitzin A. P. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russ. Geol. and Geophysics*. 2010. Vol. 51, no. 1. P. 12–47. doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.002

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Filippov A. S., Politova N. V. Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study. *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 456, no. 1. P. 635–639. doi: 10.1134/S1028334X14050353

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Aliev R. A., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D. Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea ba-

sin of the Arctic Ocean. *Dokl. Earth Sci.* 2015a. Vol. 465, no. 2. P. 1253–1256. doi: 10.1134/S1028334X1512003X

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A. Seasonal variation of fluxes of dispersed sedimentary matter in the White Sea (Arctic ocean basin). *Dokl. Earth Sci.* 2015b. Vol. 465, no. 1. P. 1182–1186. doi: 10.1134/S1028334X15110112

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White Sea. *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 472, no. 2. P. 252–255. doi: 10.1134/S1028334X17020295

Lukashin V. N., Kosobokova K. N., Shevchenko V. P., Shapiro G. I., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Pantyulin A. N., Pertzova N. M., Deev M. G., Solov'ev K. A., Prego R., Latche L. Results of multidisciplinary oceanographic studies in the White Sea in June 2000. *Oceanology*. 2003. Vol. 43, no. 2. P. 224–239.

Lukashin V. N., Isaeva A. B., Rat'kova T. N., Prego R. Particulate matter and vertical particle fluxes in the White Sea. *Oceanology*. 2003. Vol. 43. P. 159–172.

Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisitzin A. P., Novigatsky A. N. The MSL-110 small sediment trap. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 4. P. 699–703. doi: 10.1134/S0001437011040126

Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Druzhkova E. I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas. *Oceanology*. 2012. Vol. 52, no. 1. P. 112–121. doi: 10.1134/S0001437012010158

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Klyuvitkin A. A., Shevchenko V. P., Kravchishina M. D., Politova N. V. Vertical fluxes of suspended sedimentary matter in Arctic sedimentogenesis of intracontinental seas. *Doklady Earth Sciences*. 2018a. Vol. 479, no. 1. P. 384–389. doi: 10.1134/S1028334X18030200

Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A., Lisitsyn A. P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018b. P. 49–66. doi: 10.1007/698_2018_278

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical fluxes of suspended particulate matter and absolute masses of bottom sediments. *Oceanology*. 2020. Vol. 60, no. 3. P. 372–383. doi: 10.1134/S0001437020030078

Pertzova N. M., Kosobokova K. N. Zooplankton of the White Sea. History of investigations and the present state of knowledge – a review. *Berichte zur Polarforschung*. 2000. Vol. 359. P. 23–29.

Politova N. V., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Ul'yanova N. V., Chul'tsova A. L., Kravchishina M. D., Pavlova G. A., Lein A. Yu. Early diagenesis in recent bottom sediments of the Dvina Bay (White Sea). *Oceanology*. 2016. Vol. 56, no. 5. P. 702–713. doi: 10.1134/S0001437016050106

Rachold V., Eicken H., Gordeev V. V., Grigoriev M. N., Hubberten H.-W., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Schirrmeister L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Eds. R. Stein,

R. W. Macdonald. Berlin: Springer, 2004. P. 33–41. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8_2

Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresyphkin V. I. Organic matter of the World Ocean. *Russ. Geol. and Geophysics*. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 299–307. doi: 10.1016/j.rgg.2009.03.013

Shevchenko V. R., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alekseeva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'kova T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S., Filippov A. S., Lisitsyn A. P., Bobrov V. A., Bogunov A. Yu., Zaverina N. N., Zolotykh E. O., Isaeva A. B., Kokryatskaya N. M., Korobov V. B., Kravchishina M. D., Novigatsky A. N., Politova N. V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea Region). *Dokl. Earth Sci.* 2010. Vol. 430, no. 2. P. 228–234. doi: 10.1134/S1028334X10020182

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. Vol. 2. 592 p.

Vetrov A. A., Romankevich E. A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012. *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 454, no. 1. P. 44–46. doi: 10.1134/S0001437011020196

Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.-M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer, 2004. P. 101–138. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8_5

Wefer G., Fischer G. Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data. *Marine Chem.* 1991. Vol. 35, no. 1–4. P. 597–613. doi: 10.1016/S0304-4203(09)90045-7

Received February 10, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Новигатский Александр Николаевич

руководитель Аналитической лаборатории, к. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: novigatsky@ocean.ru

Шевченко Владимир Петрович

заместитель директора ИО РАН по геологическому
направлению, к. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: vshevch@ocean.ru

Клювиткин Алексей Андреевич

ведущий научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: klyuvitkin@ocean.ru

Кравчишина Марина Даниловна

ведущий научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: kravchishina@ocean.ru

Политова Надежда Вячеславовна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: politova@ocean.ru

CONTRIBUTORS:

Novigatsky, Alexander

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: novigatsky@ocean.ru

Shevchenko, Vladimir

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: vshevch@ocean.ru

Klyuvitkin, Aleksey

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: klyuvitkin@ocean.ru

Kravchishina, Marina

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: kravchishina@ocean.ru

Politova, Nadezhda

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: politova@ocean.ru

УДК 550.47:556.54

УГЛЕВОДОРОДЫ В ВОДЕ И ОСАДКАХ НОРВЕЖСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

**И. А. Немировская, А. В. Храмцова, И. С. Халиков,
Е. В. Колтовская, А. С. Соломатина**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Представлены результаты многолетних исследований распределения и состава углеводородов (УВ) в водной взвеси и донных осадках Норвежского и Баренцева морей в рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2016–2020 гг.). Установлено увеличение концентраций УВ во взвеси поверхностных вод в среднем от 2,8–8,3 (2016–2017 гг.) до 20–23 мкг/л (2019–2020 гг.), обусловленное климатическими изменениями. В донных осадках распределение УВ зависит не только от условий осадконакопления и их гранулометрического состава, но и от изменчивости окислительно-восстановительных условий и эндогенных потоков из осадочной толщи.

Ключевые слова: взвешенное вещество; донные осадки; органическое вещество; углеводороды; алканы; эндогенный источник.

**I. A. Nemirovskaya, A. V. Khramtsova, I. S. Khalikov, E. V. Koltovskaya,
A. S. Solomatina. HYDROCARBONS IN WATER AND SEDIMENTS OF THE
NORWEGIAN AND BARENTS SEAS**

The results of long-term studies of the distribution and composition of hydrocarbons (HCs) in the suspended particulate matter and bottom sediments of the Norwegian and Barents Seas during cruises of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh in 2016–2020 are presented. An increase in HCs concentrations in surface water from an average of 2.8–8.3 (2016–2017) to 20–23 µg/L (2019–2020) was detected, which was due to climate change. In bottom sediments, the distribution of HCs depends not only on the conditions of sedimentation and the particle size composition, but also on the variability of redox conditions and endogenous flows from sedimentary strata.

Key words: suspended particulate matter; bottom sediments; organic matter; hydrocarbons; alkanes; endogenous source.

Введение

Изучение углеводородов (УВ) в составе органического вещества (ОВ) и его компонентов – взвешенного органического углерода ($C_{\text{орг}}$), липидов, хлорофилла *a* (хл *a*) – в высокоширотных акваториях в значительной степени обуслов-

лено высоким нефтегазоносным потенциалом арктического шельфа, который, по последним оценкам, превышает 100 млрд т в нефтяном эквиваленте [Каминский и др., 2016]. При этом на шельф Баренцева моря приходится 24 % от суммарных углеводородных запасов. Согласно Энергетической стратегии, добыча неф-

ти на шельфе России к 2030 году должна возрасти до 33 млн т/год, в том числе в арктическом секторе – до 17 млн т/год, т. е. более чем в 17 раз (с 0,870 млн т/год в 2015 г.) [Каминский и др., 2016]. При освоении месторождений и увеличении транспортировки топлива возрастает риск загрязнения арктического бассейна нефтяными УВ. Определенный вклад в содержание УВ вносят их природные поступления из осадочной толщи [АМАР, 2007].

В условиях меняющегося климата в последние годы в экосистеме арктических морей, и в частности Баренцева моря, произошли значительные изменения, так как увеличилось влияние атлантических вод [Dalpadado et al., 2014; Arrigo, Dijken, 2015; Кодряк и др., 2017]. Поэтому существенно сократилась площадь многолетних льдов и произошло освобождение шельфа от зимнего льда [Лапина и др., 2011]. В результате первичная продукция (ПП) фитопланктона возросла в среднем на 28 % [Dalpadado et al., 2014; Arrigo, Dijken, 2015]. Изменение ПП должно оказать влияние на концентрации УВ – постоянных компонентов ОВ [Вернадский, 2001]. С целью выявления геохимических особенностей в распределении и составе УВ в Норвежском и Баренцевом морях проведено их изучение в водной взвеси и донных осадках летом 2016, 2017, 2019 и 2020 гг. в рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Материалы и методы

Воду для изучения УВ отбирали с поверхности ведром при приближении судна к станциям, а из толщи воды – батометрами (комплекс Rosette). Взвесь для анализа органических соединений (ОС) – $C_{орг}$, липидов, УВ, хл а – выделяли на стекловолокнистые фильтры GF/F (размер пор 0,7 мкм, фирмы Whatman), а для изучения взвеси – на предварительно отмытые соляной кислотой и взвешенные поликарбонатные ядерные фильтры (размер пор 0,45 мкм, полотно производства ОИЯИ, г. Дубна).

Донные осадки отбирали из дночерпателя «Океан» (слой 0–2 см) и мультикорера (колонку осадка делили по слоям 0–1, 1–2 и т. д.), сушили при температуре 50 °С, определяя влажность. Из высушенных проб отсеивали фракцию 0,25 мм, которая обычно используется в органической геохимии [Корчагина, Четверикова, 1976].

Липиды экстрагировали метиленхлоридом на ультразвуковой бане «Сапфир» при температуре 30 °С. Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагеле)

и алифатических УВ (после колоночной хроматографии) определяли ИК-методом на спектрофотометре IRAffinity-1 фирмы Shimadzu (Япония). В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37,5 % изооктана, 37,5 % гексадекана и 25 % бензола (ГСО 7248–96) [Руководство..., 1993]. Чувствительность метода – 3 мкг/мл экстракта.

Для анализа алканов из фракции УВ, выделенных методом колоночной хроматографии гексаном, использовали хроматограф «Кристалл-Люкс 4000-М», с пламенно-ионизационным детектором, капиллярной колонкой 30 м × 0,22 мм фирмы Supelco, с фазой 5 % фенила и 95 % метилполиксилана, при программировании температуры от 60 до 300 °С, со скоростью 8 °/мин, газ-носитель – гелий (скорость прохождения газа 1,5 мл/мин). Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых алканов использовали смесь калибровочных стандартов $n-C_{10}$ – C_{40} (Supelco), а в качестве внутреннего стандарта – сквалан (фирма Sigma Aldrich). Расчет проводили с помощью программного обеспечения Netchrom v2.1.

Суммарное содержание ПАУ определяли флуоресцентным методом на приборе Trilogy (стандарт – нефтепродукт в гексане, ГСО 7950) [Справочники..., 1984], а их состав – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе Lab Alliance (Shimadzu), снабженном колонкой «Диасфер» фирмы БиоХимМак (Россия). В качестве стандарта использовали смесь индивидуальных ПАУ (Supelco). В результате были определены индивидуальные полиарены, рекомендованные EPA [Monitoring..., 2011]: нафталин (НФ), 1-метилнафталин (1МНФ), 2-метилнафталин (2МНФ), аценафтен (АЦН), флуорен (ФЛР), фенантрен (ФЕН), антрацен (АЦ), флуорантен (ФЛР), пирен (ПР), бенз(а)антрацен (БААН), хризен (ХР), бенз(е)пирен (БеП), перилен (ПЛ), бенз(а)пирен (БаП), дибенз(а, h)антрацен (ДБаАН), бенз(g, h, i)перилен (БПЛ), индено[1,2,3-c, d]пирен (ИП).

$C_{орг}$ в аэрозолях и взвесьях определяли методом сухого сжигания на анализаторе АН-7560 (Россия). Концентрацию хл а определяли флуоресцентным методом на приборе Trilogy фирмы Turner (США), предварительно откалиброванном на кафедре биофизики биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Для выделения хлорофиллов фильтры помещали в 90% ацетон при температуре +4 °С и выдерживали в темноте в течение 12–16 часов [UNESCO, 1994]. Схема и последовательность операций приведены на рис. 1.

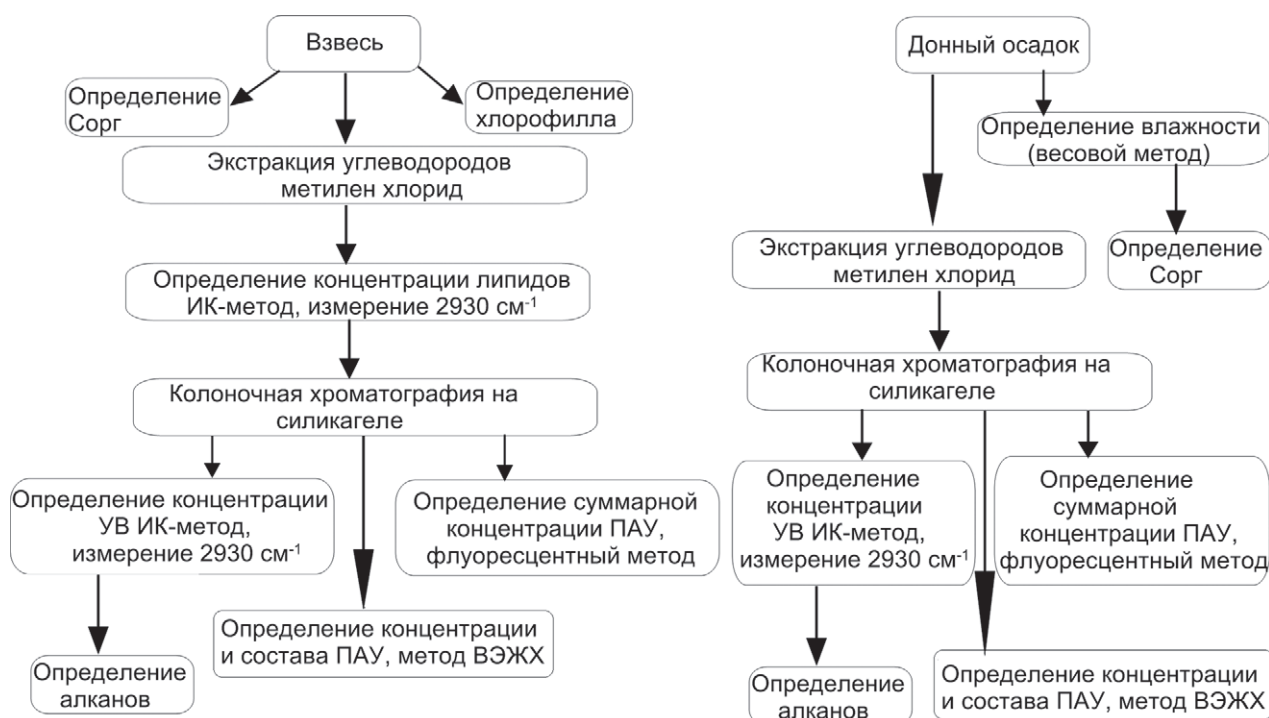


Рис. 1. Схема анализа органических соединений из фильтрационной взвеси и донных осадков

Fig. 1. Scheme for the analysis of organic compounds from filtration suspended particulate matter and bottom sediments

Результаты и обсуждение

В разные годы исследованиями в Норвежском и Баренцевом морях были охвачены вода и толща осадков на гидротермальных полях, расположенных в пределах Ян-Майенского осевого вулканического поднятия в южной части хребта Мона (в том числе гидротермальное поле Локи Касл); в местах выходов холодных метановых сипов на континентальной окраине архипелага Шпицберген и в желобе Стурфиорд; обследованы Медвежинский желоб, шельф Новой Земли, кратеры в центральной части Баренцева моря и др. [Клювиткин и др., 2020].

Исследования, проведенные в 67-м (август–сентябрь 2016 г.) и 68-м (июль–август 2017 г.) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» показали, что в поверхностных водах Баренцева моря концентрации УВ во взвеси довольно низкие (в среднем 2,8–8,3 мкг/л) [Немировская, 2020]. С переходом от осени 2016 г. к лету 2017 г. во всех исследованных районах моря произошло незначительное увеличение концентраций УВ, что может быть вызвано изменением элементного и биохимического состава ОВ [Кодрян и др., 2017].

В 2019 г. во взвеси поверхностных вод для всего массива данных содержание липи-

дов изменялось в интервале 18–114, в среднем 51 мкг/л, а УВ – 6–62, в среднем 23 мкг/л (табл. 1). Близкие результаты получены и в 2020 г.: для липидов – 15–157, в среднем 64 мкг/л, а для УВ – 9–38, в среднем 20 мкг/л.

Обусловлено это может быть разными сезонами исследования, так как в 2019 г. пробы отбирали в июне, сразу после ледостава. При таянии льдов происходит не только освобождение принесенного ими материала, но и в краевых зонах льдов создаются благоприятные условия для развития ПП. В результате величины ПП в этих районах сопоставимы с зонами апвеллингов [Мельников, Семенова, 2013]. В июне 2019 г. на ст. 6180 у кромки плавучих льдов количество взвеси возросло до 0,92 мг/л, концентрации хл а – до 2,163 мкг/л (на соседних станциях – до 3,372 и 4,690 мкг/л). При этом количество УВ составило 28 мкг/л, что было значительно выше их концентраций в 2016 и 2017 гг., не превышающих 8 мкг/л [Немировская, 2020].

Распределение УВ во взвеси и самого взвешенного вещества при одинаковых источниках обычно совпадают [Немировская, 2017]. Действительно, в общих чертах распределение УВ и взвеси было однотипным (рис. 2). Однако для всего массива данных в 2019 г. наблюдалась лишь слабая зависимость между концен-

Таблица 1. Результаты анализа органических соединений и взвеси

Table 1. Results of analysis of organic compounds and suspended particulate matter

Кол-во проб Number of samples	Район Area	Липиды, мкг/л Lipids, µg/l		Углеводороды, мкг/л Hydrocarbons, µg/L		Взвесь, мг/л Suspended matter, mg/l		Средняя УВ, мкг/мг взвеси Average HC, µg / mg of the suspended matter
		интервал средняя interval average	σ	интервал средняя interval average	σ	интервал средняя interval average	σ	
75-й рейс АМК, 2019 г. voyage #75 R/V AMK, 2019								
56	Весь район All area	18–114 51	24	6–62 23	15	0,05–1,13 0,35	0,24	72
9	Норвежское море Norwegian Sea	18–114 53	27	6–35 17	17	0,05–0,56 0,29	0,14	73
13	Зап. Шпицберген Western Spitzbergen	20–108 51	28	7–60 24	17	0,10–1,13 0,45	0,37	44
8	Вост. Шпицберген Eastern Spitzbergen	21–43 30	7	6–19 11	4	0,20–0,38 0,26	0,06	36
7	Разрез к Скандинавии Scandinavia section	35–111 54	7	18–49 29	12	0,11–0,55 0,31	0,18	126
13	Юг Баренцева моря South of the Barents Sea	32–75 55	13	11–62 32	17	0,1–0,35 0,25	0,09	134
80-й рейс АМК, 2020 г. voyage #80 R/V AMK, 2020								
20	Весь район All area	15–157 64	37	9–38 20	10	0,10–15,90 1,10	3,32	22
19*		27–157 66	37	9–38 21	10	0,10–1,47 0,36	0,31	66
6	Норвежское море Norwegian Sea	15–58 34	14	17–37 26	7	0,21–15,9 3,42	6,22	65
5*		28–58 40	11	17–31 24	5	0,21–0,45 0,31	0,10	102
14	Баренцево море Barents Sea	28–156 74	38	14–58 24	11	0,10–1,47 0,37	0,35	94

Примечание. *Без аномальной концентрации взвеси 15,9 мг/л на ст. 6840. АМК – НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Note. *Without abnormal suspension concentration of 15.9 mg/l at st. 6840. R/V AMK is the R/V Akademik Mstislav Keldysh.

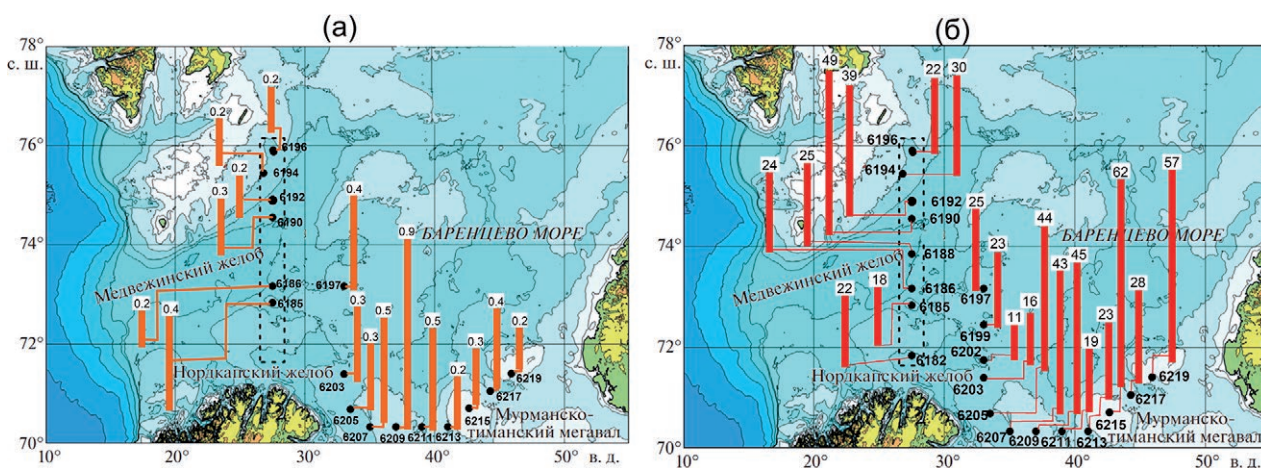


Рис. 2. Распределение взвеси (а) и алифатических УВ (б) в районах работ в 2019 г. (75-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»). Над столбцами приведены концентрации взвеси (мг/л) и УВ (мкг/л), номера станций – под столбцами

Fig. 2. Distribution of suspended particulate matter (a) and aliphatic HCs (b) in the work areas during voyage #75 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh in 2019. Concentrations of suspended matter (mg/L) and HCs (µg/L) are given above the columns, station numbers – below the columns

трациями взвеси и УВ: $r = 0,175$, $n = 53$. Лучше связь между взвесью и хл а: $r = 0,50$, с наиболее высокими значениями в районе арх. Шпицберген, где $r = 0,75$. В южной части Баренцева моря зависимости между хл а и взвесью, хл а и УВ отсутствовали: $r(\text{Вз.} - \text{хл а}) = -0,14$; $r(\text{хл а} - \text{УВ}) = -0,22$, что может указывать на разные их источники. Возможно, УВ поступают с нефтяным загрязнением, так как, согласно данным из космоса, в этой части Баренцева моря сосредоточено максимальное количество нефтяных пленок [Кучейко и др., 2020].

В 2020 г. концентрации ОС во взвеси поверхностных вод практически остались на уровне 2019 г. (табл. 1). Концентрации УВ, превышающие 50 мкг/л (ПДК для нефтяных УВ) или близкие к этой величине, установлены на судоходных путях в южной части Баренцева моря. Максимальное содержание (58 мкг/л, 170 мкг/мг взвеси) на ст. 6870 обусловлено кокситофоридным цветением, а не нефтяным загрязнением. При этом в растворенной форме концентрация УВ была значительно ниже – всего 24 мкг/л.

При переходе от поверхностного к придонному горизонту содержание УВ почти на всех станциях уменьшалось. Исключение установлено лишь на трех станциях: 6166, 6181 и 6205 (2019 г.), где содержание УВ в придонном горизонте оказалось в 1,5–5,6 раза выше, чем в поверхностном. Максимальная концентрация у дна установлена на глубине 249 м в южной части Баренцева моря на ст. 6205 – 76 мкг/л. В 2017 г. в районе Мурманской банки на глубине 46 м содержание УВ возросло практически в 3 раза по сравнению с поверхностью (с 6 до 17 мкг/л) [Немировская, 2020]. Обычно увеличение концентраций УВ у дна наблюдается в прибрежных районах

с тонкодисперсными осадками и рассматривается как результат эрозии дна и ресуспендирования [Немировская, 2013]. В работе [Кравчишина и др., 2019] показано, что в Баренцевом море четко выделялся нижний нефелоидный слой до 50 м толщиной. Поэтому в отдельных случаях при взмучивании илистых осадков происходил рост УВ в придонном горизонте.

Для изучения седиментационных процессов были проанализированы пробы придонной взвеси и поверхностного слоя воды, отобранного из мультикорера – наилка (табл. 2). Наиллок представляет собой переходную форму материала между придонной взвесью и донным осадком [Леин и др., 2013]. Содержание ОС в наилке оказалось значительно выше, чем во взвеси, выделенной из придонной воды. В частности, концентрации $C_{\text{орг}}$ в этих пробах различались в 15–106 раз. В меньшей степени увеличивалось содержание УВ (в 3,9–17,7 раза) и алканов (в 13–30 раз). Состав алканов, который определяет генезис УВ, в этих объектах также различался (рис. 3). Отношение изомеров (пристана к фитану), которое маркирует соотношение автохтонных (пристан, Pr) к «нефтяным» (фитан, Ph), во всех пробах выше во взвеси придонных вод с максимальным диапазоном на ст. 6205. Значения CPI (отношение нечетных к четным алканам), которое характеризует терригенное ОВ, различались, особенно на ст. 6205, практически в 2 раза. Обычно в составе алканов взвеси значения CPI близки к 1, особенно в поверхностных водах, где их состав формирует фитопланктон [Salot et al., 1982].

На станциях 6196 и 6217 количество низкомолекулярных гомологов в наилке было выше, чем во взвеси, а на ст. 6205, напротив, ниже. Так же неоднозначно изменялись и другие маркеры. Видимо, для того чтобы судить

Таблица 2. Состав ОС во взвеси, выделенной из придонных вод (1) и наилка (2) (2019 г.)

Table 2. The composition of the OC in the suspended particulate matter isolated from bottom waters (1) and from warp (2) (2019)

Станция (глубина) Station (depth)	$C_{\text{орг}}$, мг/л $C_{\text{орг}}$, mg/l	УВ, мкг/л НС, μg / l	Алканы, мкг/л Alkanes, μg / l	Пристан/Фитан Pristane/Phytan	CPI ($\Sigma\text{нч}/\Sigma\text{ч}$)	$\frac{\Sigma(C_{12-24})}{\Sigma(C_{25-37})}$	Доминирующие пики Dominant peaks
6196 (1)	0,015	13,0	0,1	0,93	1,82	0,63	C_{16} , C_{25} , C_{27} , C_{29}
6196 (2)	0,222	192,8	1,9	0,18	1,52	0,85	C_{15} , C_{31}
6205 (1)	0,018	76,1	1,7	2,02	1,18	0,42	C_{25} , плавное/smooth
6205 (2)	0,78	296,5	22,2	0,42	2,35	0,37	C_{25} , C_{27} , C_{31}
6217 (1)	0,018	26,3	0,1	1,13	1,44	0,45	C_{23} , C_{25} , C_{27}
6217 (2)	1,92	464,9	3,0	0,63	1,31	0,98	C_{25} , C_{27}

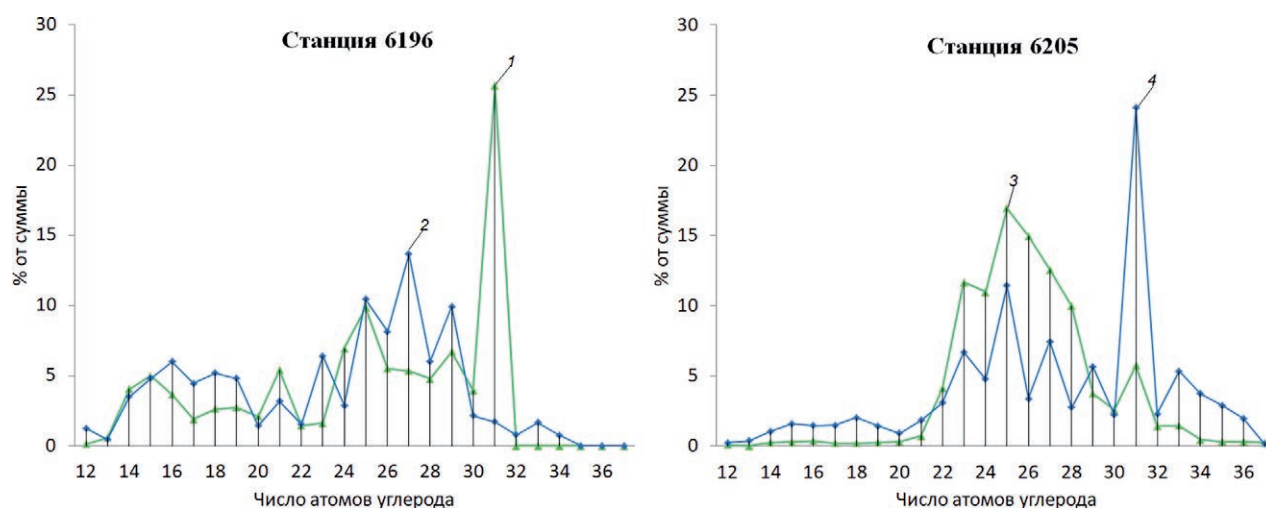


Рис. 3. Состав алканов, выделенных из придонных вод (1, 3) и из наилка (2, 4)

Fig. 3. Composition of alkanes isolated from bottom waters (1, 3) and from warp (2, 4)

о процессах, происходящих на границе вода-осадок, необходимо провести дополнительные исследования на большом количестве образцов. Однако полученные данные показывают, что на границе вода-дно резко меняется состав УВ.

В донных осадках в поверхностных слоях содержание УВ (в пересчете на сухую массу) изменялось в 2016 г. в интервале 3–44 мкг/г (в среднем 14 мкг/г, 0,15 % от $C_{орг}$). Максимум их концентраций приурочен к району Медвежинского желоба, где распределение концентраций УВ и $C_{орг}$ совпадало ($r = 0,81$, $n = 10$), несколько хуже связь между этими параметрами в осадках Русской гавани ($r = 0,61$, $n = 8$). В акватории Штокмановского месторождения эта зависимость полностью отсутствовала: $r(C_{орг} - УВ) = 0,02$ ($n = 7$), а $r(УВ - Вл.) = -0,45$ (Вл. – влажность осадков), что может указывать на дополнительные источники ОВ, не связанные с минеральной матрицей [Петрова и др., 2015].

В 2017 г. диапазон концентраций в поверхностном слое осадков составил 4–57 мкг/г (в среднем 12 мкг/г, 0,17 % от $C_{орг}$). Максимум их содержания приурочен к северной оконечности арх. Новая Земля, а повышенное – к углистым отложениям Восточного шельфа Шпицбергена (до 37 мкг/г). Наиболее высокие значения коэффициента корреляции между $C_{орг}$ и УВ наблюдались в западных ($r = 0,67$, $n = 11$) и северных районах Баренцева моря, у берегов Шпицбергена эта зависимость проявлялась в меньшей степени ($r = 0,48$, $n = 16$). Еще хуже связь между этими величинами в центральной части моря ($r = 0,27$, $n = 7$), что обусловлено меньшим влиянием седиментационных процессов на формирование УВ.

В 2019 г. содержание УВ в донных осадках изменялось в интервале 5–64 мкг/г. В Норвежском море в осадках разлома Ян-Майнен концентрации УВ колебались в интервале 5–51 мкг/г, с максимальной величиной в тонкодисперсном осадке ст. 6131 (рис. 4). В Баренцевом море высокое содержание УВ установлено на Восточном шельфе Шпицбергена (51 мкг/г, ст. 6196), а максимальное – в южной части (64 мкг/г, ст. 6213).

В 2020 г. для различных районов Норвежского и Баренцева морей диапазон концентраций был больше: 3–186 мкг/г, с максимумом на ст. 6842 в Стурфиорде (рис. 5), где доля УВ в составе $C_{орг}$ составила 1,18 %. Обычно в донных осадках содержание УВ в составе $C_{орг}$ колеблется в пределах 0,28–0,56 % [Немировская, 2013]. Только в акваториях с антропогенными нефтяными поступлениями, грязевым вулканизмом, гидротермальной активностью или эндогенной миграцией их концентрации превышали 1 %. На ст. 6841, где, согласно гидрофизическим данным, был установлен наиболее значительный флюидный поток, содержание УВ в поверхностном слое составило всего 36,7 мкг/г (0,24 % от $C_{орг}$). То есть эти данные показывают, что поступление УВ с флюидами из толщи осадков происходит на ограниченной площади. В зависимости от условий в геологических структурах под морским дном сипы могут активизироваться, на время прекращать свою активность либо вовсе исчезать, а затем появляться вновь [Патин, 2008].

В толще донных осадков концентрации $C_{орг}$ на отдельных станциях традиционно уменьшались. В частности, в 2017 г. при переходе от горизонта 0–5 к 10–15 см – в 1,1 (ст. 5551) и в 1,7

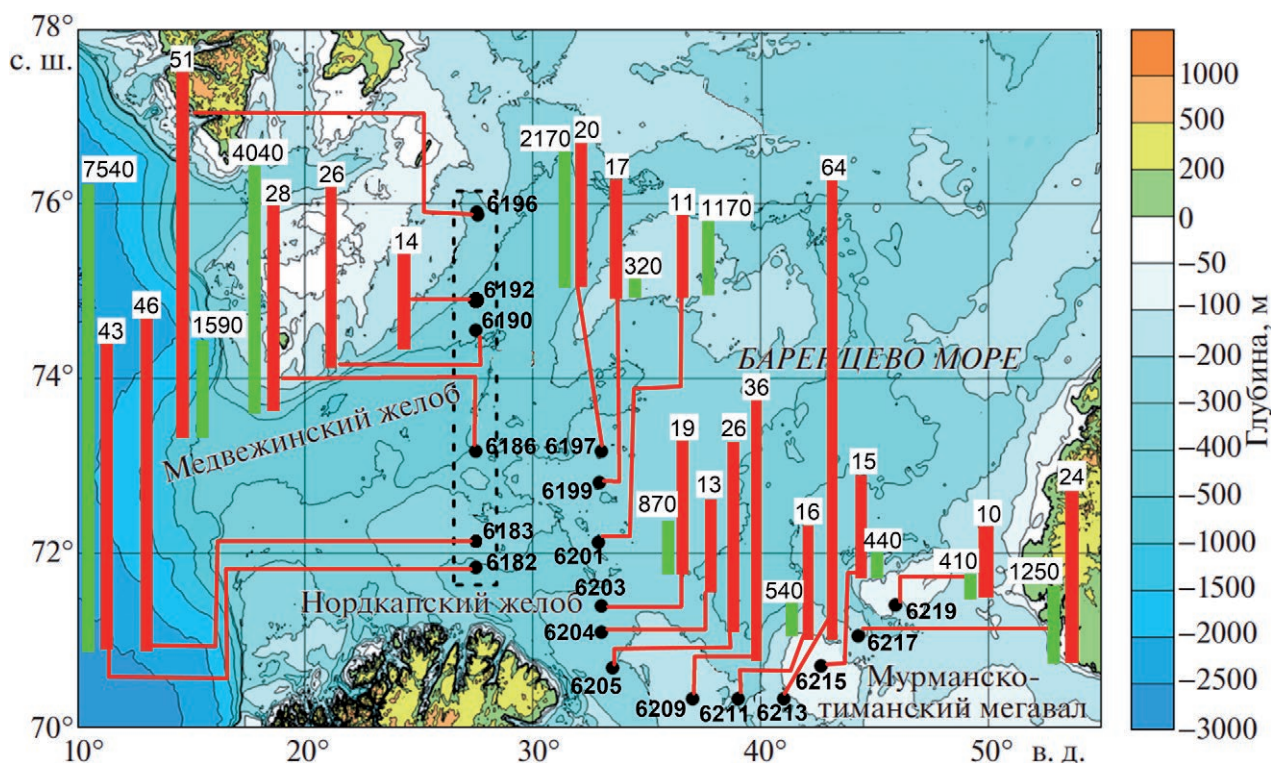


Рис. 4. Распределение УВ (красные столбцы, мкг/г) и ПАУ (зеленые столбцы, нг/г) в поверхностном слое донных осадков Баренцева моря. Жирным шрифтом обозначены номера станций (75-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig. 4. Distribution of HCs (red columns, μg/g) and PAHs (green columns, ng/g) in the surface layer of bottom sediments of the Barents Sea, station numbers are indicated in bold (voyage #75 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

(ст. 5524) раза (рис. 6). Содержание УВ на отдельных станциях также уменьшалось с глубиной захоронения, даже в большей степени, чем $C_{орг}$. В Лафонтенской котловине на ст. 5522 при переходе от слоя 0–5 см к слою 5–10 см концентрации УВ уменьшались в 14 раз, а их доля в составе $C_{орг}$ – в 2 раза. Сильно восстановленная среда с активно протекающими процессами сульфат-редукции и микробиологической переработкой биомассы планктона, поступившей в осадки, приводит к уменьшению содержания УВ при переходе от поверхностного к подповерхностному слою. Диагенетические процессы осложнены еще и тем, что осадки в верхних горизонтах на этих станциях одновозрастные и глубина слоя перемешивания, обусловленного биотурбацией, лежит в пределах 6–9 см.

На других станциях не наблюдалось уменьшения концентраций УВ с глубиной захоронения, и на отдельных горизонтах их содержание, напротив, возрастало. В частности, на ст. 5555 в районе архипелага Шпицберген (глубина 200 м) от слоя 0–5 см к слою 5–10 см концентрация УВ выросла в 53 раза, а в составе $C_{орг}$ – в 66 раз (от 0,03 до 2,0 %; рис. 6). Максимальная величина УВ на этой станции в пересчете на сухой

осадок (272 мкг/г) и в составе $C_{орг}$ (2,2 %) установлена на горизонте 15–20 см. Осадки указанного района отличались высоким нефтегазогенерационным потенциалом.

Условия седиментации и процессы, происходящие в толще осадков, формируют различный состав алканов, так как соотношение основных маркеров менялось в зависимости от местоположений станций (рис. 7).

Значения CPI изменялись в широком интервале: 1,98–5,40. Практически во всех пробах доминировали высокомолекулярные гомологи. Во многих осадках в составе алканов в низкомолекулярной области фиксировалось повышение концентраций $n-C_{17}$ – основного гомолога фитопланктона. Рост коэффициента изопреноидности ($K_i = (Pr+Ph)/(C_{17}+C_{18})$) указывал на интенсивность микробиальной трансформации ОВ. Величина K_i , отношение низко- к высокомолекулярным гомологам и значения CPI в большей степени изменялись в поверхностном слое осадков на шельфе арх. Шпицберген и в Медвежинском желобе, что подтверждали также низкие значения отношения n -алканов к нафто-ароматическим соединениям, изменяющиеся в интервале 0,03–0,22.

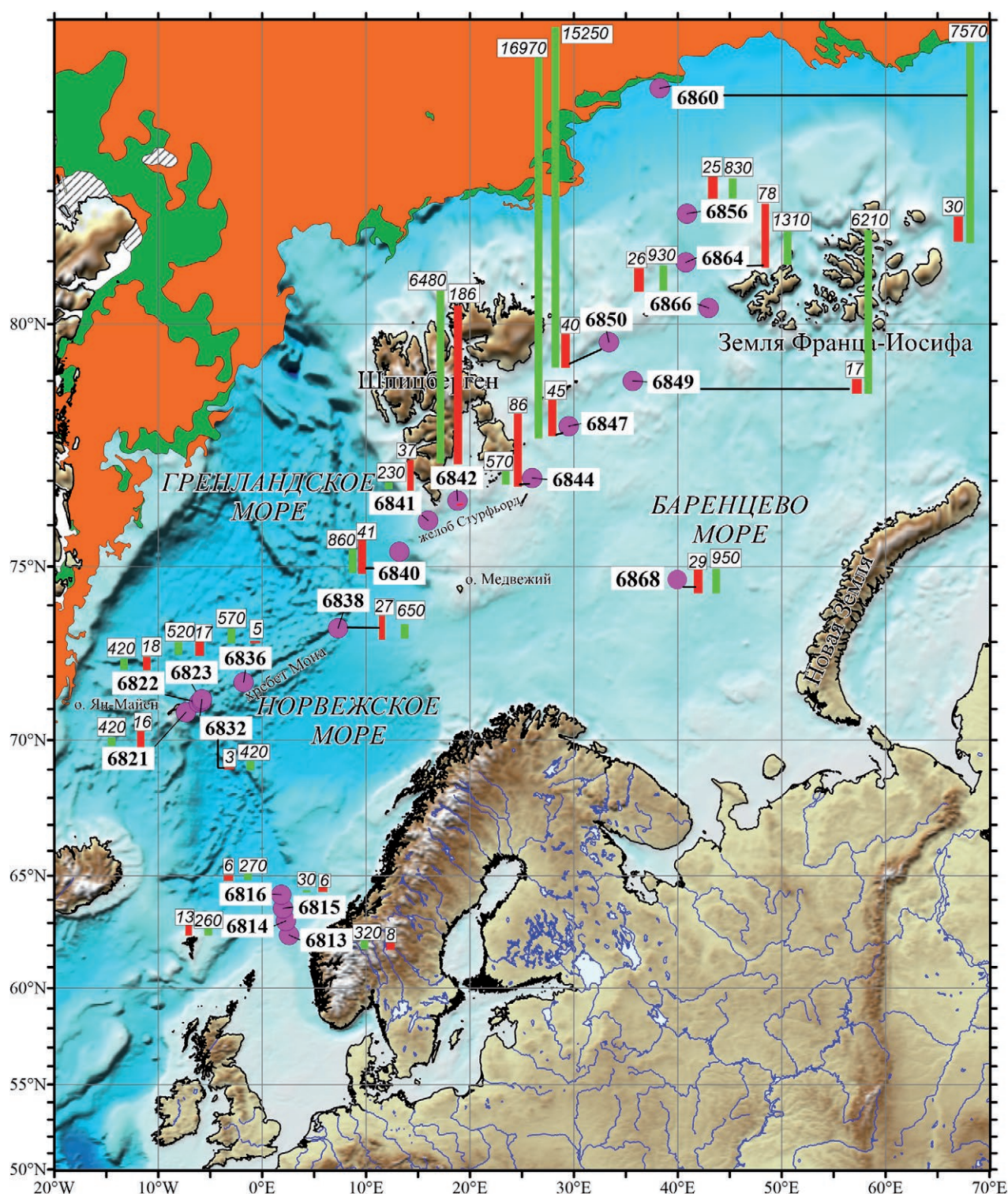


Рис. 5. Распределение УВ (красные столбцы, мкг/г) и ПАУ (зеленые столбцы, нг/г) в поверхностном слое донных осадков Баренцева моря. Жирным шрифтом обозначены номера станций (80-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig. 5. Distribution of HCs (red columns, $\mu\text{g/g}$) and PAHs (green columns, ng/g) in the surface layer of bottom sediments of the Barents Sea, station numbers are indicated in bold (voyage #80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

Необычное распределение УВ наблюдалось в осадочной толще в Стурфиорде (2020 г.), где не происходило плавного уменьшения со-

держания УВ в осадочной толще. На ст. 6841 (рис. 8) содержание УВ увеличивалось почти в 5 раз при переходе от поверхности к слою

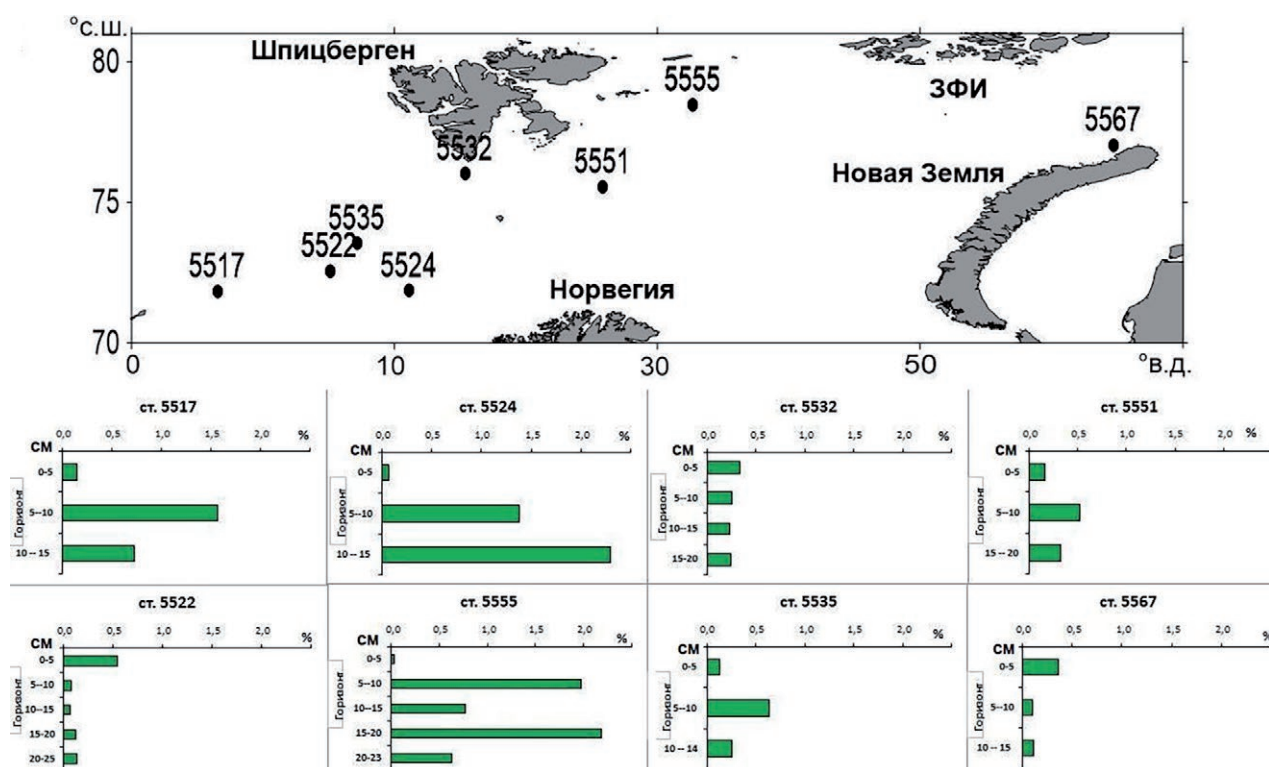


Рис. 6. Изменение содержания УВ в составе C_{org} (%) с глубиной захоронения на отдельных станциях (2017 г., 68-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig. 6. Change in HCs content in the composition of C_{org} (%) with the depth of burial at some stations (2017, voyage #68 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

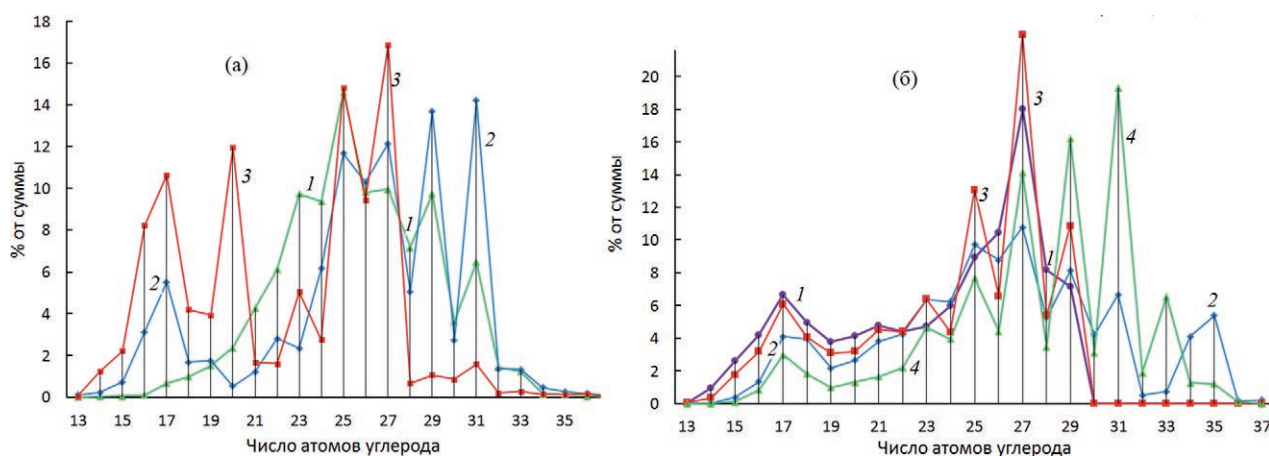


Рис. 7. Изменение состава алканов в донных осадках (2017 г., 68-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») с глубиной захоронения: (а) – на ст. 5517 (N71°17.927', E05°46.393') 1 – 0–5 см, 2 – 5–10 см, 3 – 10–15 см; (б) – на ст. 5555 (N78°28.318', E33°43.640') 1 – 5–10 см, 2 – 10–15 см, 3 – 15–20 см, 4 – 20–23 см

Fig. 7. Changes in the composition of alkanes in bottom sediments (2017, voyage #68 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) with the depth of burial: (a) at station 5517 (N71°17.927', E05°46.393') 1 – 0–5 cm, 2 – 5–10 cm, 3 – 10–15 cm; (b) – at station 5555 (N78°28.318', E33°43.640') 1 – 5–10 cm, 2 – 10–15 cm, 3 – 15–20 cm, 4 – 20–23 cm

5–6 см (с 37 до 237 мкг/г), в области резкого изменения редокс-потенциала (Eh изменялось от –30 до –80).

При этом состав алканов на ст. 6841 по содержанию и распределению низкомолекулярных гомологов резко отличался от такового

на соседней ст. 6840 (рис. 9). Только на этой станции среди алканов доминируют низкомолекулярные гомологи (увеличивается отношение L/H). Последнее свидетельствует об интенсивности автохтонных процессов в осадочной толще даже на горизонте 22–26 см. При этом

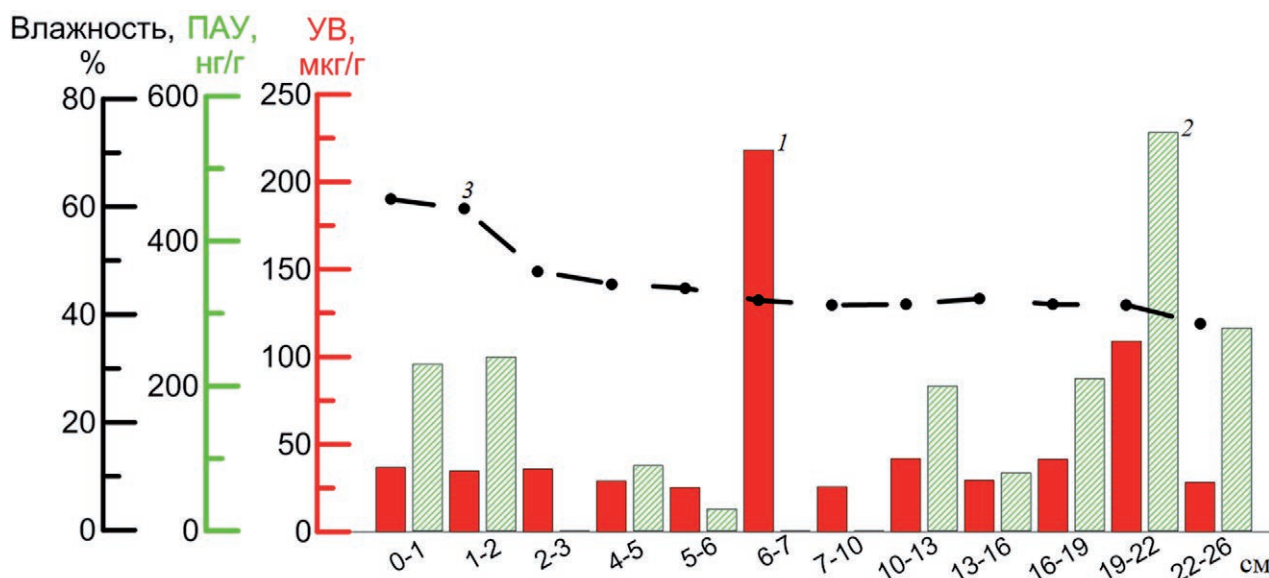


Рис. 8. Распределение алифатических УВ (1), ПАУ (2) и влажности осадков (3) с глубиной захоронения на ст. 6841 (2020 г., 80-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig. 8. Distribution of aliphatic HCs (1), PAHs (2) and precipitation moisture (3) with the depth of burial at st. 6841 (2020, voyage #80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

величина CPI на ст. 6840 (в среднем 1,8, максимум 2,6) выше, чем на ст. 6841 (в среднем 1,4, максимум 1,8), что может указывать на меньшую трансформацию высокомолекулярных гомологов в районе сипа.

Распределение ПАУ в поверхностных осадках носит мозаичный характер (рис. 5). Их суммарное содержание изменялось в пределах от 230 до 16970 нг/г. Столь широкий концентрационный диапазон, видимо, обусловлен не только разными литолого-фациальными условиями осадконакопления, но и относительной изменчивостью основных геохимических параметров в осадочной толще. В отличие от алифатических УВ наиболее высокие концентрации ПАУ установлены на шельфе арх. Шпицберген, где и ранее в углистых осадках были отмечены повышенные их величины [Dahle et al., 2006]. Специфика этой аномалии имеет устойчивый характер, так как отмечается многими исследователями [AMAP, 2007; Dahle et al., 2006 и др.].

На станциях в Стурфиорде в составе ПАУ доминировали 2-, 3-кольчатые арены: нафталин, 2-метил-нафталин (27–43 % от суммы) и фенантрен (рис. 10). Нафталины – наименее устойчивые соединения, которые должны разлагаться в процессе седиментации [Tolosa et al., 2004]. При этом на ст. 6841 повышенные концентрации нафталинов и фенантрена приурочены к поверхностному, а на ст. 6847 на шельфе арх. Шпицберген – к нижнему гори-

зонт 24–27 см, то есть их образование происходит непосредственно в толще осадков.

Флюидные потоки и их трансформация в поверхностном слое донных осадков рассматривались в качестве основного источника УВ при исследовании донных осадков в районе Штокмановской площади [Петрова и др., 2015; Немировская, 2020]. Считается, что УВ могут двигаться во флюидных потоках как отдельная фаза по порам осадочных пород и оставлять геохимический след в поверхностных осадках благодаря аккумуляции, особенно в местах газовой разгрузки [England et al., 1987]. Низкие величины CPI, которые в основном были ≤ 2 , свидетельствуют о биогенном образовании алканов и могут служить подтверждением этого предположения. Если принять газовый флюид за газ-носитель, а осадочные породы и содержащееся в них ОВ за сорбент и сорбат, легко представить, что извлекаться газовым потоком будут преимущественно низкомолекулярные вещества неразветвленного, компактного строения [AMAP, 2007]. Поэтому в составе ПАУ происходит увеличение нафталинов (рис. 10).

Аномалии в составе алифатических УВ и ПАУ с глубиной захоронения позволяют предположить в качестве источника их поступление из нижележащих горизонтов. Высокий нефтегазоносный потенциал Баренцева моря и особенности поверхности морского дна (воронки покмарков) делают данное предположение вполне обоснованным.

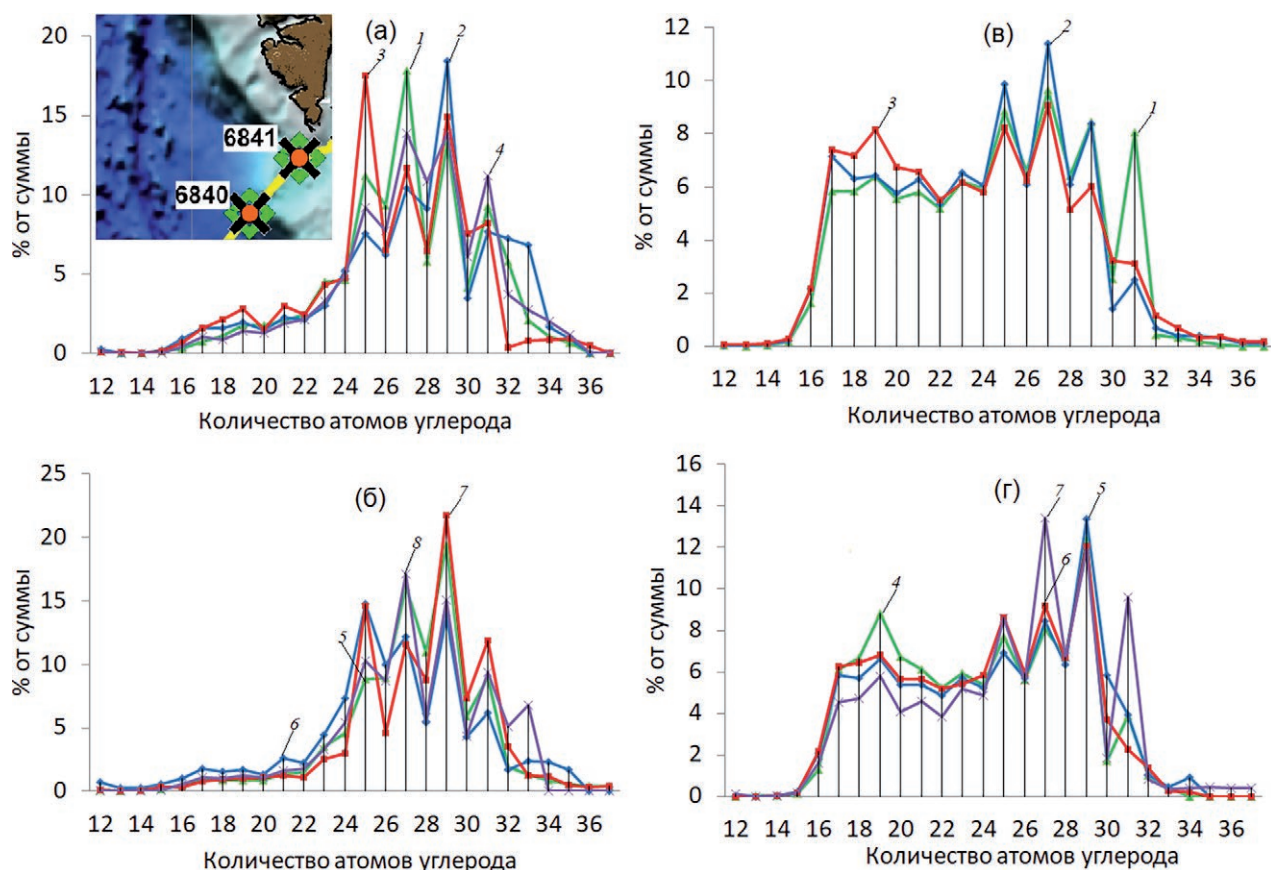


Рис. 9. Изменение состава алканов с глубиной захоронения на станциях 6840 (а): 1 – 0–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4; (б): 5 – 4–5, 6 – 5–6, 7 – 6–7, 8 – 7–8 и 6841 (в): 1 – 0–1, 2 – 2–3, 3 – 4–5, (г): 4 – 6–7, 5 – 10–13, 6 – 16–19, 7 – 22–26 см (2020 г., 80-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig. 9. Changes in the composition of alkanes with the depth of burial at stations 6840 (a): 1 – 0–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4; (б): 5 – 4–5, 6 – 5–6, 7 – 6–7, 8 – 7–8 and 6841: (в): 1 – 0–1, 2 – 2–3, 3 – 4–5, (г): 4 – 6–7, 5 – 10–13, 6 – 16–19, 7 – 22–26 cm (2020, voyage #80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

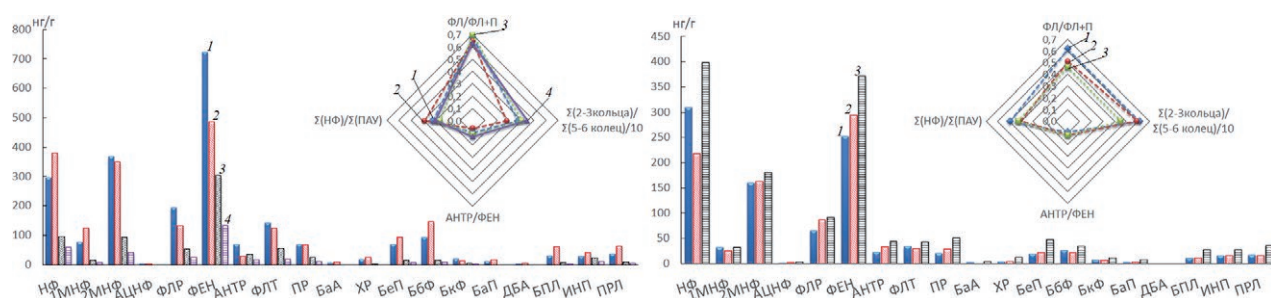


Рис. 10. Изменение состава ПАУ с глубиной захоронения на станциях 6841: 1 – 0–1, 2 – 3–4, 3 – 5–6, 4 – 7–8 см и 6847: 1 – 1–2, 2 – 5–6, 3 – 24–27 см (2020 г., 80-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Fig.: 10. Changes in the PAH composition with the burial depth at stations 6841: 1 – 0–1, 2 – 3–4, 3 – 5–6, 4 – 7–8 cm and 6847: 1 – 1–2, 2 – 5–6, 3 – 24–27 cm (2020, voyage #80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)

Выводы

В поверхностных водах произошел рост концентраций алифатических УВ во взвеси с 2,8–8,3 (2016–2017 гг.) до 20–23 (2019–2020 гг.) мкг/л, обусловленный прикромочным цветением. Климатические измене-

ния, вызвавшие увеличение ПП в Баренцевом море, привели также к росту концентраций УВ. Повышенное содержание УВ в южной части Баренцева моря (до 58 мкг/л, 2020 г.) связано не только с возросшим судоходством, но и с коколитовидным цветением, то есть природные процессы приводят к формирова-

нию более высоких концентраций УВ. Нефелюидные слои оказывают влияние на распределение УВ в придонном горизонте, а интенсивность процессов на границе взвесь-донные осадки – на их состав.

В поверхностном слое донных осадков увеличение концентраций УВ (до 48–186 мкг/г) происходит в зонах разломов (Стурфиорд, Медвежинский желоб и т. д.), а для ПАУ – в углистых месторождениях Шпицбергена (15250–16970 нг/г). Различный генезис алифатических УВ и ПАУ приводит к отсутствию корреляции в распределении этих углеводородных классов, а также их связи с $C_{орг}$.

В толще осадков разгрузка эндогенных флюидных потоков, изменчивость окислительно-восстановительной обстановки способствует не только утилизации отдельных компонентов в составе УВ, но и образованию автохтонных низкомолекулярных алканов, а в составе ПАУ – нафталинов.

В настоящее время природные процессы, происходящие в Баренцевом море, оказывают большее влияние на формирование состава и уровней алифатических УВ и ПАУ, чем антропогенные.

Экспедиции проведены в рамках госзадания Минобрнауки России (тема № 0128-2021-0006), участие в экспедиции сотрудников осуществлялось при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00234), геохимические исследования и обобщение материалов – в рамках гранта РФФИ 20–35–90025.

Литература

- Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 2001. 376 с.
- Каминский В. Д., Супруненко О. И., Смирнов А. Н., Медведева Т. Ю., Черных А. А., Александрова А. Г. Современное ресурсное состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы шельфовой области Российской Арктики // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 136–142.
- Клювиткин А. А., Кравчишина М. Д., Немировская И. А., Баранов Б. В., Коченкова А. И., Лисицын А. П. Исследование седиментосистем Европейской Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 485–487.
- Кодряня К. В., Торгунова Н. И., Агатова А. И. Растворенное и взвешенное органическое вещество в период изменчивости ледового покрова Баренцева моря // Труды ВНИРО. 2017. Т. 169. С. 191–203.
- Корчагина Ю. И., Четверикова О. П. Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М.: Недра, 1976. 228 с.
- Кравчишина М. Д., Новигатский А. Н., Саввичев А. С., Паутова Л. А., Лисицын А. П. Исследование седиментосистем Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна в 68-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2019. Т. 59, № 1. С. 167–169.
- Кучейко А. А., Иванов А. Ю., Евтушенко Н. В., Филимонова Н. А., Терлеева Н. В., Ивонин Д. В., Александрова А. Г. Пленочные загрязнения Баренцева моря по данным радиолокационного мониторинга 2017–2019 гг. // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 7. С. 48–55.
- Лапина Н. М., Торгунова Н. И., Агатова А. И. Органическое вещество во льдах Северного Ледовитого океана // Вопросы промысловой океанологии. 2011. Вып. 8, № 2. С. 156–172.
- Леин А. Ю., Маккавеев П. Н., Саввичев А. С., Кравчишина М. Д., Беляев Н. А., Дара О. М., Поняев М. С., Захарова Е. Е., Розанов А. Г., Иванов М. В., Флинт М. В. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 643–679.
- Мельников И. А., Семенова Т. Н. Характеристика криобиологической фауны современного морского ледяного покрова Центрального Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. Т. 98, № 4. С. 14–25.
- Немировская И. А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 432 с.
- Немировская И. А. Осадочное вещество и органические соединения в аэрозолях и в поверхностных водах на трансатлантическом разрезе // Геохимия. 2017. № 4. С. 344–357.
- Немировская И. А. Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова // Геохимия. 2020. Т. 65, № 7. С. 822–824.
- Патин С. А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М.: ВНИРО, 2008. 507 с.
- Петрова В. И., Батова Г. И., Куршева А. В., Моргунова И. В. Углеводороды в донных осадках Штокмановской площади – распределение, генезис, временные тренды // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. № 3. doi: 10.173.53/2070-5379/35_2015
- Руководство по методам анализа морских вод / Под ред. С. Г. Орадовского. СПб.: Гидрометеорологическое издательство, 1993. 264 с.
- Справочники и руководства. МОК/ВМО. Париж: Юнеско, 1984. № 13. 34 с.
- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, 2007. 87 p.
- Arrigo K. R., van Dijken G. L. Continued increases in Arctic Ocean primary production // Progr. Oceanogr. 2015. Vol. 136. P. 60–70.
- Dahle S., Savinov V., Petrova V., Klungsøyr J., Savinova T., Batova G., Kursheva A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Norwegian and Russian Arctic marine sediments: concentrations, geographical dis-

tribution and sources // Norw. J. Geol. 2006. Vol. 86, no. 1. P. 41–50.

Dalpadado P., Ingvaldsen R. B., Stige L. C., Bogstad B., Knutsen T., Ottersen G., Ellertsen B. Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics ICES // J. Mar. Sci. 2012. Vol. 69, no. 7. P. 1303–1316.

Ehrhardt J. D. Negative-ion mass spectra of methylated diuretics // Repid. Com. Mass. Spect. 1992. Vol. 6, no. 5. P. 349–351.

England W. A., MacKenzie A. S., Mann D. M., Quigley T. M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface // J. Geol. Soc. 1987. Vol. 144. P. 327–347.

Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP). Tromsø: Akvaplan-niva, 2011. 71 p.

References

Kaminskii V. D., Suprunenko O. I., Smirnov A. N., Medvedeva T. Yu., Chernykh A. A., Aleksandrova A. G. Sovremennoe resursnoe sostoyanie i perspektivy osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy shel'fovoi oblasti Rossiiskoi Arktiki [The current resource state and prospects for the development of the mineral resource base of the shelf area of the Russian Arctic]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2016. No. 9. C. 136–142.

Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Nemirovskaya I. A., Baranov B. V., Kochenkova A. I., Lisitsyn A. P. Issledovanie sedimentosistem Evropeiskoi Arktiki v 75-m reise nauchno-issledovatel'skogo sudna "Akademik Mstislav Keldysh" [Study of sediment systems of the European Arctic during the 75th voyage of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2020. Vol. 60, no. 3. P. 485–487.

Kodryan K. V., Torgunova N. I., Agatova A. I. Ras-tvorennoe i vzheshennoe organicheskoe veshchestvo v period izmenchivosti ledovogo pokrova Barentseva morya [Dissolved and suspended organic matter during the period of variability of the ice cover of the Barents Sea]. *Trudy VNIRO* [Proceed. VNIRO]. 2017. Vol. 169. P. 191–203.

Korchagina Yu. I., Chetverikova O. P. Metody issledovaniya rasseyannogo organicheskogo veshchestva osadochnykh porod [Methods for studying dispersed organic matter of sedimentary rocks]. Moscow: Nedra, 1976. 228 p.

Kravchishina M. D., Novigatskii A. N., Savvichev A. S., Pautova L. A., Lisitsyn A. P. Issledovanie sedimentosistem Barentseva morya i Norvezhsko-Grenlandskogo basseina v 68-m reise nauchno-issledovatel'skogo sudna "Akademik Mstislav Keldysh" [Study of sediment systems of the Barents Sea and the Norwegian-Greenland basin during the 68th voyage of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2019. Vol. 59, no. 1. P. 167–169.

Kucheiko A. A., Ivanov A. Yu., Evtushenko N. V., Filimonova N. A., Terleeva N. V., Ivonin D. V., Aleksandrova A. G. Plenochnye zagryazneniya Barentseva morya po dannym radiolokatsionnogo monitoringa 2017–2019 gg. [Film pollution of the Barents Sea ac-

Salot A., Goutx M., Fefrier A., Tusseau D., Andrie C. Organic sedimentation in the water column in the Arabian Sea; relationship between the lipid composition of small and large-size, surface and deep particle // *Mar. Chem.* 1982. Vol. 11, no. 3. P. 257–278.

Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M. R., Ville-neuve J., Bartocci J., Cattini C. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // *Mar. Pollut. Bull.* 2004. Vol. 48. P. 44–60.

UNESCO. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides. Paris: UNESCO Publ., 1994. No. 29. P. 128–134.

Поступила в редакцию 10.02.2021

cording to radar monitoring data in 2017–2019]. *Ekol. i promyshlennost' Rossii* [Ecol. and Industry of Russia]. 2020. Vol. 24, no. 7. P. 48–55.

Lapina N. M., Torgunova N. I., Agatova A. I. Organicheskoe veshchestvo vo l'dakh Severnogo Ledovitogo okeana [Organic matter in the ice of the Arctic Ocean]. *Voprosy promyslovoi okeanologii* [Issues of Commercial Oceanology]. 2011. Iss. 8, no. 2. P. 156–172.

Lein A. Yu., Makkaveev P. N., Savvichev A. S., Kravchishina M. D., Belyaev N. A., Dara O. M., Ponyaev M. S., Zakharova E. E., Rozanov A. G., Ivanov M. V., Flint M. V. Protsessy transformatsii vzevi v osadok v Karskom more [Processes of transformation of suspended matter into sediment in the Kara Sea]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2013. Vol. 53, no. 5. P. 643–679.

Mel'nikov I. A., Semenova T. N. Kharakteristika krio-biologicheskoi fauny sovremennogo morskogo ledyanogo pokrova tsentral'nogo arkticheskogo basseina [Characteristics of the cryobiological fauna of the modern sea ice cover of the central Arctic basin]. *Problemy Arktiki i Antarkтики* [Arctic and Antarctic Problems]. 2013. Vol. 98, no. 4. P. 14–25.

Nemirovskaya I. A. Neft' v okeane (zagryaznenie i prirodnye potoki) [Oil in the ocean (pollution and natural fluxes)]. Moscow: Nauchnyi mir, 2013. 432 p.

Nemirovskaya I. A. Osadochnoe veshchestvo i organicheskie soedineniya v aerolyakh i v poverkhnostnykh vodakh na transatlanticheskoi razreze [Sedimentary matter and organic compounds in aerosols and in surface waters in the Transatlantic section]. *Geokhim.* [Geochem.]. 2017. No. 4. P. 344–357.

Nemirovskaya I. A. Uglevodorody v vodakh i donnykh osadkakh Barentseva morya v period izmenchivosti ledovogo pokrova [Hydrocarbons in the waters and bottom sediments of the Barents Sea during the period of ice cover variability]. *Geokhim.* [Geochem.]. 2020. Vol. 65, no. 7. P. 822–824.

Patin S. A. Neftyanye razlivy i ikh vozdetsvie na morskuyu sredu i biorekursy [Oil spills and their effect on the marine environment and biorecources]. Moscow: VNIRO, 2008. 507 p.

Petrova V. I., Batova G. I., Kursheva A. V., Morgunova I. V. Uglevodorody v donnykh osadkakh Shtok-

manovskoi ploshchadi – raspredelenie, genezis, vremennye trendy [Hydrocarbons in bottom sediments of the Shtokman area – distribution, genesis, and temporal trends]. *Neftegazovaya geol. Teoriya i praktika* [Petroleum Geol. Theory and Practice]. 2015. No. 3. doi: 10.173.53/2070–5379/35_2015

RD 52.10.243-92. Rukovodstvo po metodam analiza morskikh vod [RD 52.10.243-92. Guide on seawater chemical analyses]. Ed. S. G. Oradovsky. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. 264 p.

Spravochniki i rukovodstva. MOK/VMO [Reference books and manuals. IOC / WMO]. Paris: UNESCO Publ., 1984. No. 13. 34 p.

Vernadskii V. I. Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzheniya [The chemical structure of the Earth's biosphere and its environment.]. Moscow: Nauka, 2001. 376 p.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, 2007. 87 p.

Arrigo K. R., van Dijken G. L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progr. Oceanog.* 2015. Vol. 136. P. 60–70.

Dahle S., Savinov V., Petrova V., Klungsøyr J., Savinova T., Batova G., Kursheva A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Norwegian and Russian Arctic marine sediments: concentrations, geographical distribution and sources. *Norw. J. Geol.* 2006. Vol. 86, no. 1. P. 41–50.

Dalpadado P., Ingvaldsen R. B., Stige L. C., Bogstad B., Knutsen T., Ottersen G., Ellertsen B. Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics ICES. *J. Mar. Sci.* 2012. Vol. 69, no. 7. P. 1303–1316.

Ehrhardt J. D. Negative-ion mass spectra of methylated diuretics. *Repid. Com. Mass. Spect.* 1992. Vol. 6, no. 5. P. 349–351.

England W. A., MacKenzie A. S., Mann D. M., Quigley T. M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *J. Geol. Soc.* 1987. Vol. 144. P. 327–347.

Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP). Tromsø: Akvaplan-niva, 2011. 71 p.

Salot A., Goutx M., Fefrier A., Tusseau D., Andrieu C. Organic sedimentation in the water column in the Arabian Sea; relationship between the lipid composition of small and large-size, surface and deep particle. *Mar. Chem.* 1982. Vol. 11, no. 3. P. 257–278.

Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M. R., Villeneuve J., Bartocci J., Cattini C. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 2004. Vol. 48. P. 44–60.

UNESCO. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides. Paris: UNESCO Publ., 1994. No. 29. P. 128–134.

Received February 10, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Немировская Инна Абрамовна

главный научный сотрудник, д. г.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: nemir44@mail.ru
тел.: +79104508460

Храмцова Анастасия Владимировна

младший научный сотрудник
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: asya-medvedeva95_16@mail.ru
тел.: 89856431074

Халиков Ильдус Салихович

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: khalikov@typhoon.obninsk.ru

Колтовская Екатерина Владимировна

аспирант
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: katyayaya15@gmail.com

Соломатина Александра Сергеевна

младший научный сотрудник
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: blackmaple@yandex.ru
тел.: 89168715023

CONTRIBUTORS:

Nemirovskaya, Inna

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: nemir44@mail.ru
tel.: +79104508460

Khramtsova, Anastasia

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: asya-medvedeva95_16@mail.ru
tel.: +79856431074

Khalikov, Ildus

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: khalikov@typhoon.obninsk.ru

Koltovskaya, Ekaterina

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: katyayaya15@gmail.com

Solomatina, Alexandra

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia
e-mail: blackmaple@yandex.ru
tel.: +79168715023

УДК 556.114.7: 556.55

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА, АЗОТА И ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Д. В. Иванов¹, Е. В. Осмелкин², И. И. Зиганшин¹

¹ Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, Казань, Россия

² Государственный природный заповедник «Присурский», Чебоксары, Россия

Выполнен анализ показателей накопления органического углерода, азота и фосфора в донных отложениях разнотипных озер Чувашской Республики. Отмечена дифференциация вещественного состава отложений озер Низменного Заволжья и Приволжской возвышенности по содержанию углерода и азота, связанная с продукционными особенностями озер северной и южной географических провинций. По содержанию фосфора подобная дифференциация отсутствовала. Выявлен квазистационарный характер распределения органического углерода, азота и фосфора в пределах верхней метровой осадочной толщи.

Ключевые слова: озера; донные отложения; органическое вещество; биогенные элементы; Чувашская Республика.

D. V. Ivanov, E. V. Osmelkin, I. I. Ziganshin. SPATIAL REGULARITIES OF CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS ACCUMULATION IN LAKE SEDIMENTS OF THE CHUVASH REPUBLIC

Indicators of organic carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in lake sediments of the Chuvash Republic were analyzed. Lakes of trans-Volga Lowlands and the pre-Volga Upland demonstrated a differentiation by the content of carbon and nitrogen in their sediments, associated with the productivity characteristics of lakes in the northern and the southern geographic provinces. No such differentiation was observed for the phosphorus content. The distribution of organic carbon, nitrogen and phosphorus within the top 1-meter of the sediments was quasi-stationary.

Key words: lakes; sediments; organic matter; nutrients; Chuvash Republic.

Введение

При проведении исследований озерных экосистем состав и свойства донных отложений (ДО) озер принято рассматривать не только в числе наиболее информативных показателей их текущего экологического состояния, но и в качестве индикаторов различных при-

родных и антропогенных процессов, происходивших в водоеме и на его водосборе в историческом прошлом. ДО, как аккумуляторы органических и минеральных веществ в водной экосистеме, фиксируют нарушения природных геохимических циклов поллютантов в своем составе и свойствах. Со временем ДО становятся источниками вторичного загряз-

нения водных масс органическими веществами (ОВ) и биогенными элементами, формируя внутреннюю биогенную нагрузку на водоемы. В толще ДО накоплена информация о стадиях развития процессов эвтрофикации в водоеме. Ее расшифровка, включая сведения о концентрации биогенных элементов в отдельных слоях отложений, помогает выделять основные исторические этапы природно-антропогенной трансформации озерных экосистем, формировать прогностические модели их функционирования.

В Среднем Поволжье показатели содержания органического углерода, азота и фосфора в ДО озер ранее исследовались только на территории Республики Татарстан [Иванов, Зиганшин, 2006; Иванов и др., 2011], охватывающей лесостепные участки Низменного и Высокого Заволжья, а также Вятско-Камскую возвышенность в лесной зоне. Для Чувашской Республики (ЧР), в физико-географическом отношении расположенной в пределах лесной части Низменного Заволжья и лесостепи Приволжской возвышенности, аналогичные сведения малочисленны [Озера..., 1976]. При этом они представляют несомненный интерес при установлении общих закономерностей процессов накопления ОВ и биогенных элементов в озерных экосистемах региона, а также при планировании практических природоохранных мероприятий, направленных на решение задач оптимизации землепользования и водопользования и экологической реабилитации водных объектов.

Материалы и методы

С целью установления региональных показателей накопления органического углерода, азота и общего фосфора в ДО в 2007–2015 гг. были выполнены седиментологические исследования 62 озер на территории ЧР. Дополнительно в выборку данных включены два озера (Провальное и Собакино), расположенные в Республике Татарстан, и два озера (Большой и Малый Юлуксьер) в Республике Марий Эл. Все исследуемые водные объекты расположены в провинциях Приволжской возвышенности (Предволжья) и Низменного Заволжья (Заволжья) [Физико-географическое..., 1964] (рис. 1). По происхождению озерных котловин они относятся к карстовым (12 озер), междюнным (4), пойменным (15) и искусственным (35) водоемам. Площадь водного зеркала исследуемых озер изменялась от 1,12 до 88,23 га, преобладали озера размером 2–5 га. По трофическому статусу 79 % озер от-

несены к эвтрофным, 14 % – к гипертрофным и только 7 % – к мезотрофным.

Отбор поверхностных проб ДО выполнен дночерпателем ДАК-100, кернов – гравитационными трубками ГОИН-1 и ГОИН-1.5. После отбора керны разделяли на равные слои мощностью 5(10) см для последующего анализа.

На водосборной территории озер производили отбор смешанных образцов поверхностных (0–20 см) горизонтов почв с учетом преобладающих элементов рельефа.

В образцах ДО и почв определяли гранулометрический состав [ГОСТ 12536–2014], содержание ОВ по потерям при прокаливании (ППП) при 550 °С [ГОСТ 26213–91], общего (органического) азота ($N_{орг}$) [ГОСТ 26107–84] и общего фосфора ($P_{общ}$) [ГОСТ 26261–84]. Всего проанализировано 442 образца ДО, в том числе 364 образца ДО озер Приволжской возвышенности и 58 образцов ДО Низменного Заволжья.

Выделение типов ДО выполнено на основе классификации В. П. Курдина [1960] и Б. И. Новикова [1985], модифицированной В. В. Законовым [2007].

При рассмотрении географических закономерностей поступления и накопления ОВ в ДО озер в качестве одной из задач рассматривалось приведение результатов его косвенного определения по величине ППП к показателям, выраженным на органический углерод. Для этого применялся эмпирически полученный коэффициент пересчета ППП на содержание ОВ. В основу расчета коэффициента легли данные по вещественному составу ДО озер и малых водохранилищ Средней Волги ($N = 314$), расположенных в сходных физико-географических условиях.

Содержание ОВ (%) рассчитывали по формуле:

$$ОВ = 0,5 \times ППП.$$

При вычислении процентной доли органического углерода в составе ДО использовали коэффициент 0,58, обычно применяемый для пересчета доли $C_{орг}$ в составе почвенного гумуса [Аринушкина, 1961].

В конечном виде формула пересчета для определения доли $C_{орг}$ (%) в составе ДО озер выглядит так:

$$C_{орг} = 0,5 \times ППП \times 0,58 = 0,29 \times ППП.$$

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием пакета Statistica 10.0. При оценках средних величин и сравнении выборок данных использовалась медиана вариационного ряда, а при установлении различных зависимостей – непараметрические критерии.



Рис. 1. Карта-схема расположения озер:

Низменное Заволжье: I – Ветлужско-Кокшагский полесский район; Приволжская возвышенность: II – Чебоксарский возвышенно-равнинный район со зрелым эрозионным ландшафтом, III – Цивиль-Кубнинский возвышенно-равнинный лесостепной район эрозионного ландшафта, IV – Засурский полесский район смешанных лесов, V – Средне-Свияжский возвышенно-равнинный остепненный район

Fig. 1. Location of the lakes:

Low-lying Zavolzhye (Trans-Volga Lowlands): I – Vetluzhsko-Kokshagsky polessky (woodland) region; Volga Upland: II – Cheboksary upland-plain region with a mature erosional landscape, III – Tsvil-Kubninsky upland-level forest-steppe region of erosional landscape, IV – Zasurskiy polessky (woodland) region of mixed forests, V – Sredne-Sviyazhsky upland-plain steppe region

Результаты и обсуждение

Скорость накопления осадочного материала в озерах Приволжской возвышенности и Низ-

менного Заволжья отличается широким диапазоном значений – от 70 до 11 000 г/(м²·год) [Иванов и др., 2018]. Средние показатели аккумуляции вещества на современном этапе при-

родно-антропогенной трансформации лимнических систем ЧР находились на едином для исследуемых провинций уровне – 1600 г/(м²·год). Установлено преобладание аутигенного характера накопления ДО в водоемах Низменного Заволжья и терригенного – в Приволжской возвышенности. По результатам анализа величин поступления и накопления осадков в озерах ЧР было установлено, что при переходе от средних за сезон к среднегодовым и среднегодовым показателям имеющиеся специфические черты динамики осадконакопления в пространственном отношении полностью сглаживались. Темпы современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской и Заволжской географических провинций республики имели признаки квазистационарности [Иванов и др., 2018], что, несомненно, было важно учитывать при рассмотрении пространственной однородности накопления биогенных элементов в составе ДО.

Органический углерод. В озерах ЧР преобладают минеральные типы ДО. Основной диапазон концентраций органического углерода в ДО озер – 2–4 %, что составляет около 2/3 анализируемой выборки (табл. 1). ДО водоемов Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья кардинально отличались между собой по накоплению ОВ: в Предволжье преобладали концентрации $C_{орг}$ от 3,0 до 3,6 %, а в осадках озер Заволжья – от 14,5 до 26,0 %.

Указанные различия обусловлены соотношением основных источников поступления ОВ в озера. Так, для макрофитных карстовых и междюнных озер Низменного Заволжья характерно накопление автохтонного ОВ, продуцируемого высшей водной растительностью. По классификации Л. Л. Россолимо [1964] их можно отнести к озерам – накопителям ОВ. ДО озер провинции представлены торфогенными и торфянистыми илами и отложениями из макрофитов. В осадках некоторых озер провинции визуально фиксировалось ОВ, состоящее из хорошо сохранившихся фрагментов тканей листовых пластинок типичных для южнотажной подзоны лиственных пород – березы и осины.

Вклад тирфогенного (почвенного) материала в накопление $C_{орг}$ в заволжских озерах имеет подчиненное значение. Лесные массивы, в окружении которых расположены эти водоемы, произрастают на бедных ОВ дерново-подзолистых почвах, сформированных на хорошо дренируемых песчаных древнеаллювиальных отложениях. Поверхностный сток здесь практически отсутствует.

В геохимической системе «водораздел – озеро» соотношение $C_{орг}$ в почвах и ДО литорали и профундали озер Заволжья выглядит как 1 : 0,07 : 3 (рис. 2). Литораль озер, как и почвенный покров, сложена мелко- и грубозернистыми песками, накопление в них ОВ выражено

Таблица 1. Содержание органического углерода, азота и фосфора в ДО озер Чувашской Республики (ЧР), %
Table 1. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in lake sediments of the Chuvash Republic, %

Географические провинции Geographic provinces	Среднее Average	Медиана Median	Min	Max	Коэффициент вариации Coefficient of variation
$C_{орг} / C_{орг}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	17,6	15,8	0,04	26,8	45
Приволжская возвышенность Volga Upland	4,0	3,3	0,10	27,4	81
ЧР в целом Chuvash Republic	5,2	3,4	0,04	27,4	106
$N_{орг} / N_{орг}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	1,48	1,22	0,05	5,41	76
Приволжская возвышенность Volga Upland	0,22	0,13	0,01	2,63	136
ЧР в целом Chuvash Republic	0,39	0,15	0,01	5,41	167
$P_{общ} / P_{tot}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	0,72	0,18	0,01	9,42	226
Приволжская возвышенность Volga Upland	0,21	0,19	0,01	1,03	61
ЧР в целом Chuvash Republic	0,29	0,19	0,01	9,42	232

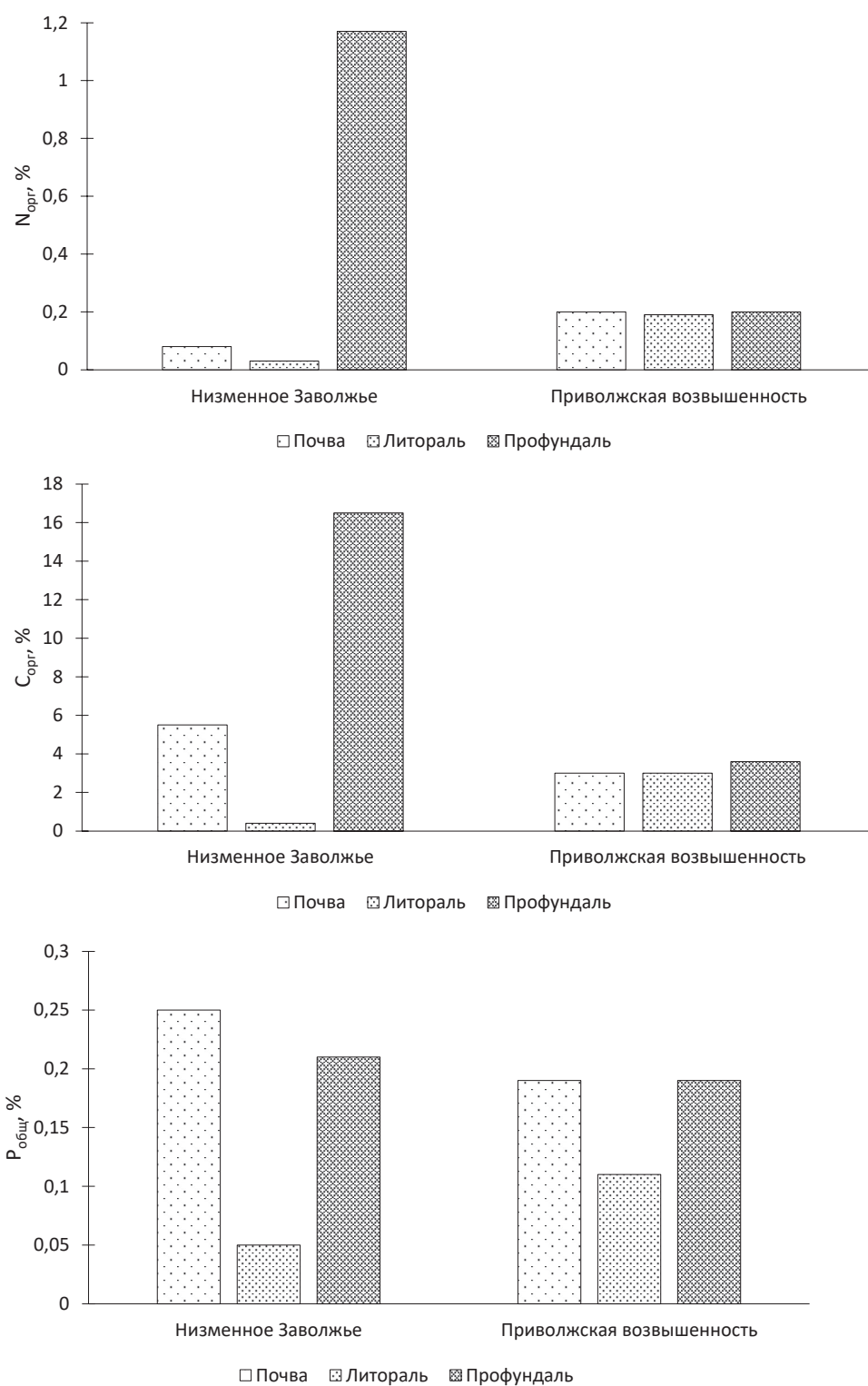


Рис. 2. Содержание органического углерода, азота и фосфора в почвах и поверхностных ДО литорали и профундали озер, %

Fig. 2. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in soils and surface sediments of the littoral and profundal zones of the lakes

более чем в 40 раз слабее, чем в глубоководной зоне озер, где органические частицы формируют осадки типа сапропелей.

На территории Приволжской возвышенности преобладают бессточные озера – аккумуляторы наносов. Их осадки представлены ми-

Таблица 2. Содержание органического углерода, азота и фосфора в кернах ДО в зависимости от глубины залегания, %

Table 2. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in sediment cores depending on the sampling interval, %

Интервал залегания, см Sampling interval, cm	Среднее Average	Медиана Median	Min	Max	Коэффициент вариации Coefficient of variation
$C_{\text{орг}} / C_{\text{орг}}$					
0–10	4,6	3,5	0,1	27,4	86
10–100	5,6	3,3	0,9	28,7	109
$N_{\text{орг}} / N_{\text{орг}}$					
0–10	0,29	0,19	0,03	2,26	121
10–100	0,43	0,13	0,01	5,41	171
$P_{\text{общ}} / P_{\text{tot}}$					
0–10	0,29	0,19	0,01	2,72	130
10–100	0,29	0,19	0,01	9,42	260

неральными типами – в основном песчанистыми и глинистыми илами [Осмелкин и др., 2017] (табл. 1). Органические ДО с содержанием $C_{\text{орг}}$ 10 % и выше отмечены всего лишь в нескольких пойменных водоемах Засурского полесского района смешанных лесов (Присурский заповедник).

Однако в озерах Предволжья с терригенным типом осадконакопления доля органических соединений в общей массе отложений не всегда следовала за распределением суммарной величины аккумуляции вещества. Эффект «разбавления» органической части осадка минеральной, о чем упоминала М. В. Мартынова [2010], у этих водоемов находится в зависимости от характера эрозионных процессов на водосборах. При доминировании плоскостной эрозии в озера поступают гумусовые соединения почв, что приводит к росту содержания в ДО терригенного ОВ. Этот источник пополнения запасов органического углерода в ДО озер Приволжской возвышенности является весьма существенным, учитывая, что в структуре почвенного покрова провинции преобладают темно-серые почвы и черноземы с содержанием гумуса до 9 %. На это указывают практически равные средние показатели содержания углерода в осадках литорали (3,0 %) и профундали (3,6 %) озер, а также в верхних горизонтах почв (3,0 %) водосборных территорий (рис. 2). Другой, также широко распространенный в Предволжье, вид эрозии – линейная (или овражная) служит источником поступления в озера взвешенных частиц – продуктов разрушения горных пород, практически лишенных ОВ, и тем самым усиливает эффект «разбавления» органической части осадка.

Квазистационарность – признак не только количественной стороны озерного седиментогенеза, имеющего разносторонние проявления

на исследуемой территории, но и отражение неизменности его качественной составляющей. Это подтверждено результатами сравнения содержания $C_{\text{орг}}$ в слоях ДО, отличающихся по времени своего образования, статистическая разница средних значений в которых была недостоверна ($p < 0,05$) (табл. 2). Равенство медианных концентраций $C_{\text{орг}}$ характерно как для ДО озер Низменного Заволжья, так и для водоемов Приволжской возвышенности.

По результатам усреднения были построены интегральные графики вертикального распределения концентраций $C_{\text{орг}}$ в колонках отложений в интервалах 0–10, 10–20, 20–30 см и т. д. для совокупности исследованных озер, расположенных в различных физико-географических районах ЧР (рис. 3). Их анализ показал, что в озерах Чебоксарского и Средне-Свияжского районов Приволжской возвышенности концентрации $C_{\text{орг}}$ в верхних 60 см отличались друг от друга не более чем на 1 %, в Цивиль-Кубнинском районе – на 1,5 %, т. е. были стабильны во времени.

В Засурском районе, где выборка данных включала только озера пойменного типа, минимальная концентрация $C_{\text{орг}}$ в осадочном профиле отличалась от максимальной уже на 3 %, но при этом и сами концентрации ОВ в ДО этих озер также были заметно выше – 4,5–6,7 %. Кроме того, в отложениях озер Засурья обозначен волнообразный рост содержания ОВ от нижних слоев к верхним как отражение эволюции старичных озер, которые проходят в своем развитии ряд последовательных стадий, включающих зарастание, накопление детритного ОВ и постепенное занесение.

В озерах Низменного Заволжья (Ветлужско-Кокшагский район), напротив, было отмечено снижение доли $C_{\text{орг}}$ в современных осадках по сравнению со слоями отложений, распо-

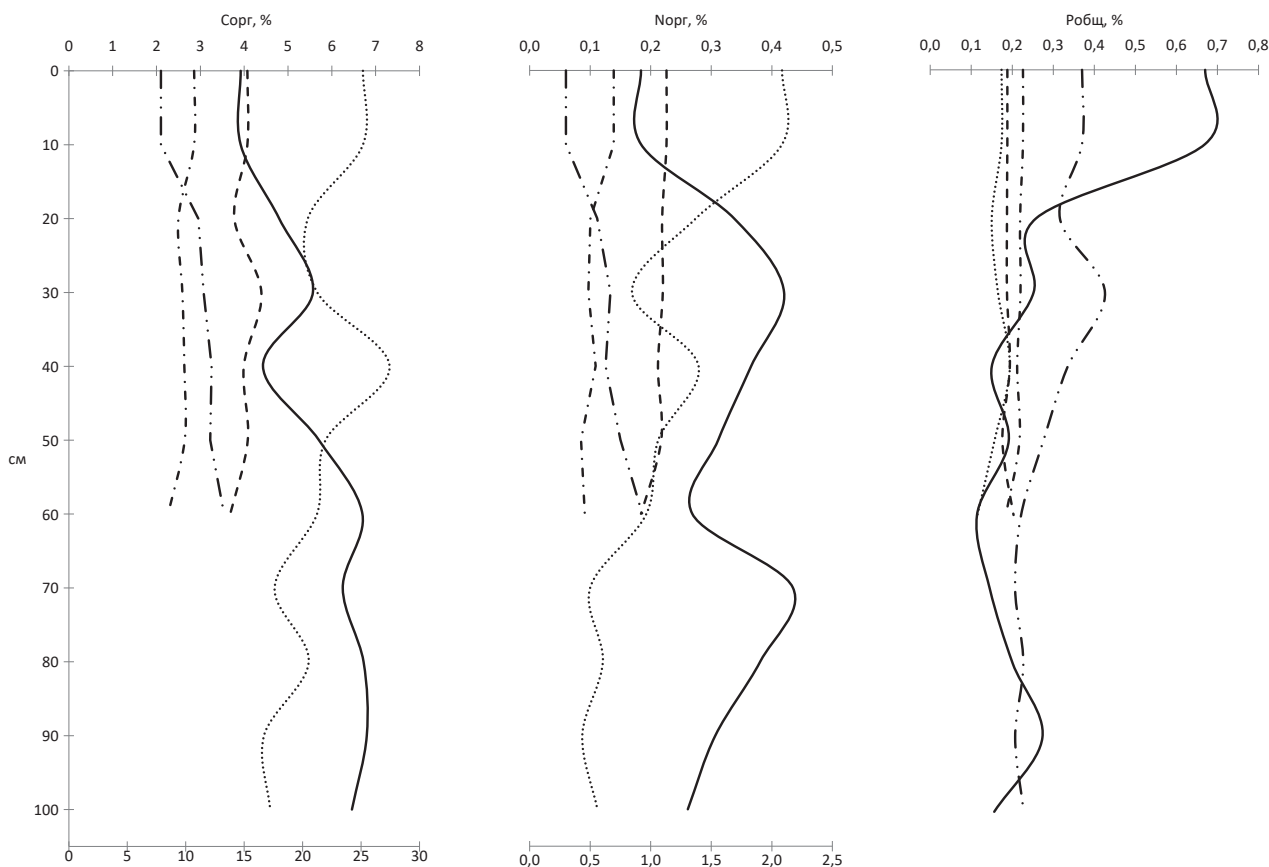


Рис. 3. Характер распределения углерода, азота и фосфора в кернах ДО. Нижняя ось – Ветлужско-Кокшагский район

Fig. 3. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in sediment cores. Lower axis – Vetluzhsko-Kokshagysky District

ложенными на глубине около 1 м, с 25 до 15 % (рис. 3). Причина – сукцессионные изменения, происходящие в экосистемах этих озер.

Молодые искусственные водные объекты – пруды и копани, образованные в руслах малых водотоков, – выделялись выраженной положительной динамикой содержания ОВ в вертикальном профиле. В большинстве прудов в среднем вдвое меньшее содержание $C_{орг}$, чем в современных отложениях, отмечалось в первые годы после их создания. С завершением активной фазы переформирования берегов и ложа в прудах, как и в крупных водохранилищах, наблюдается постепенное снижение доли внутриводоемных минеральных веществ – продуктов абразии берегов – и возрастание вклада автохтонной органической взвеси. По мере выполаживания рельефа дна, формирования устойчивых мелководий и заселения их высшей водной растительностью роль последней в приходной статье баланса ОВ неуклонно растет.

Установлено, что уровень содержания органического углерода в минеральных ДО озер Чу-

вашии тесно связан с их гранулометрическим составом. В типологическом ряду «пески (илистые пески) – песчанистые илы – глинистые илы» медианное содержание $C_{орг}$ выражается величинами 0,6; 1,7 и 3,5 % соответственно. Эти значения (в пересчете на ППП) близки к показателям, определенным В. В. Законновым с целью классификации типов грунтов волжских водохранилищ [Законнов, 2007]. Результаты изучения ДО озер ЧР и выполненные ранее исследования состава и свойств ДО озер Республики Татарстан и водохранилищ Средней Волги [Законнов и др., 2007] показывают, что предложенная классификационная схема является универсальной и может использоваться для типизации и характеристики состава и свойств ДО разнотипных водоемов европейской части России.

Органический азот. Азот поступает в озеро преимущественно в минеральной форме, а также в составе аллохтонного (почвенного) ОВ [Мартынова, 2010]. В эвтрофируемых озерах значительное развитие получают сине-

зеленые водоросли, которые обладают способностью фиксировать молекулярный азот из атмосферы.

Дальнейший вектор движения соединений азота в водной экосистеме связан с их аккумуляцией в живом веществе бактериальной массы, планктона, высшей водной растительности, бентоса и рыб. После отмирания биомассы часть накопленного в ней азота высвобождается в водную толщу, другая проходит более длительную стадию регенерации, находясь в составе ДО.

Темпы депонирования $N_{орг}$ в ДО зависят от качественного состава и объемов поступления в них органических остатков, а также от скорости преобразования соединений органического и минерального азота в ходе седиментации и осадкообразования. Деструкция ОБ обуславливает высвобождение азота в водную толщу и последующее включение в новый цикл биологического круговорота в водоеме. В этой связи следовало ожидать тесной количественной взаимосвязи установленных показателей накопления органического углерода в ДО озер Чувашии с аналогичными показателями аккумуляции соединений азота.

Статистические показатели распределения азота в ДО озер ЧР представлены в табл. 1. В озерах преобладают осадки с содержанием $N_{орг}$ от 0,01 до 0,50 %. Показатели среднего содержания и варьирования $N_{орг}$ в ДО озер республики не отличаются от аналогичных характеристик, установленных для мезотрофных озер европейской части России [Мартынова, 2010; Белкина, 2011]. В эту группу попадают большинство озер Приволжской возвышенности и некоторые озера Низменного Заволжья. В ДО озер Заволжья находится в среднем в 9,4 раза больше азота, что обусловлено соответствующим уровнем накопления ОБ в водоемах, расположенных в этой провинции.

Структурные связи между азотом и углеродом в ДО указывают на единство источников их поступления и подтверждаются значимыми ($p < 0,05$) коэффициентами корреляции (Низменное Заволжье $r = 0,91$, Приволжская возвышенность $r = 0,68$), а также преимущественно синхронным характером изменения их концентраций в вертикальном профиле отложений (рис. 3).

Внешняя биогенная нагрузка (как азотная, так и фосфорная) на водоемы Приволжской возвышенности на протяжении десятилетий формировалась за счет поступления растворенных и взвешенных минеральных и органических веществ с распаханых водосборов этой части ЧР. Сложная экономическая ситуация, в которой страна находилась примерно до

конца девяностых годов XX в., привела к существенному снижению объемов вносимых в почву удобрений, что положительно сказалось на поступлении биогенных элементов в озеро и, соответственно, на качестве воды. При этом весомый пул азота, имеющийся в почвах, способствовал формированию довольно сглаженной картины его поступления и накопления в ДО (рис. 3). Среди водораздельных озер только в Цивиль-Кубнинском районе заметно снижение концентраций $N_{орг}$ в слое 10–20 см, соответствующем этому периоду.

В современных ДО озер большинства физико-географических районов ЧР обозначился отчетливый тренд к росту содержания органического азота (табл. 2, рис. 3). В слое 0–10 см его концентрации по сравнению с расположенными ниже осадочными слоями возросли почти в 1,5 раза. Причиной этого является развитие аграрного сектора республики в последние два десятилетия и, соответственно, нарастание внешней биогенной, в первую очередь азотной, нагрузки. Соединения минерального азота обладают на порядок большей растворимостью и подвижностью в почвах по сравнению с фосфором, поэтому их приоритетный рост поступления в водоемы и депонирования в ДО выглядит вполне очевидным.

С ландшафтно-геохимических позиций поведение азота в системе «водосбор – озеро» также следовало за распределением ОБ (рис. 2). Его медианные концентрации в почвах, ДО литорали и профундали статистически не различались и были равны 0,20 %.

Общий фосфор. Содержание в ДО общего фосфора, как и органического азота, изменялось в широких пределах и обуславливало соответствующие показатели его вариабельности, достигающие двух порядков (табл. 1). Если исключить из расчетов экстремальные (более 2 %) значения, характерные только для оз. Когояр (Низменное Заволжье), питаемого болотными водами, то окажется, что 92 % измеренных концентраций $P_{общ}$ в ДО озер ЧР укладывается в диапазон от 0,01 до 0,40 %.

Количественные вариации поступления и депонирования фосфора в водоемах ЧР служат отражением совокупности многообразных проявлений биотических и абиотических факторов зонального и азонального характера. Сравнение выборок данных по составу отложений озер Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья не выявило достоверных различий между ними по содержанию $P_{общ}$ (критерий Манна – Уитни, $p = 0,56$), несмотря на то, что средние арифметические концентрации элемента отличались в 3,5 раза (табл. 1). Дело

в том, что при реализации алгоритма усреднения концентраций фосфора в системе «пространство (водоемы) – время (разновременные слои отложений)» фактически происходит нивелирование наблюдаемого размаха значений, при котором, в соответствии с законом больших чисел, существующие зональные особенности его накопления в ДО озер в пределах рассматриваемого региона сглаживаются. Так, в малопродуктивных озерах Приволжской возвышенности накопление фосфора в минеральных ДО обязано аллохтонным источникам, терригенным продуктам эрозии почв и пород. В зарастающих лесных озерах Заволжья основная доля фосфора, аккумулированного в составе отложений, связана с коллоидными гидроокислами железа и автохтонным ОВ.

Слабо проявляющаяся в зависимости от почвенно-биоклиматических, ландшафтно-географических особенностей территории и иных факторов дифференциация накопления фосфора в осадках озер Чувашии лежит в русле установленных ранее закономерностей его пространственного распределения в ДО озер Татарстана [Иванов, Зиганшин, 2006]. Здесь для водоемов таежно-лесной и лесостепной зон уровень $P_{\text{общ}}$ в ДО также был однороден в физико-географическом отношении и характеризовался средней величиной 0,23 %.

В отношении фосфора также подтвержден квазистационарный характер его накопления в профиле ДО. Между выборками, объединяющими поверхностные и более древние осадки озер, статистически значимые ($p < 0,05$) отличия по данному элементу отсутствовали (табл. 2). Исключение составили озера Ветлужско-Кокшагского района, где фосфора больше содержится в поверхностном слое (рис. 3). Причиной является рост продуктивности водоемов Низменного Заволжья, консервация фосфора в составе детритного ОВ и накопление железа в верхних слоях осадков. Ряд озер – Когояр, Астраханка, Большой и Малый Юлуксьер и др. – питаются болотными водами. Их отличает присутствие в воде Fe в форме гидроокислов, роль которых в процессах сорбции и осаждения ортофосфатов в природных водах хорошо известна, как и влияние на аккумуляцию фосфора в ДО [Мартынова, 2010]. Так, если в слое 10–100 см среднее содержание Fe было равно 0,61 %, то на современной стадии осадконакопления оно достигло 1,86 %. По-видимому, окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные условия, складывающиеся в придонных горизонтах вод и контактирующих с ними отложениях озер провинции Низменного Заволжья, благоприятствуют удержанию

фосфора в илах в иммобилизованном состоянии. Снижение внутренней биогенной нагрузки, возникающий вследствие этого дефицит свободного фосфора в воде и конкурентные отношения с высшей водной растительностью за источники питания обуславливают довольно слабое развитие в большинстве озер Низменного Заволжья планктонных сообществ и их олиготрофный характер.

Следует подчеркнуть, что корреляционная связь между фосфором и железом была характерна для ДО не только озер Заволжья ($r = 0,44$, $p < 0,05$), но и водоемов Приволжской возвышенности ($r = 0,28$, $p < 0,05$), где Fe также играет важную роль в круговороте фосфора.

Радиальное распределение $P_{\text{общ}}$ в сопряженных элементах ландшафтно-геохимической системы выглядит по-разному и зависит от рассматриваемого физико-географического региона (рис. 2). На территории Приволжской возвышенности его соотношение в ряду «почва – литораль – профундаль» равно 1 : 0,6 : 1, что подчеркивает связь накопления фосфора в ДО озер и почвах водосборных бассейнов через поступление с терригенным стоком. Между содержанием $P_{\text{общ}}$ и частиц $< 0,01$ мм в ДО озер Предволжья установлена значимая корреляция ($r = 0,44$, $p < 0,05$). В отложениях заволжских озер такая связь отсутствовала, что предполагает иные источники поступления фосфора в водоемы провинции. Здесь искомое отношение приобретает вид 1 : 0,2 : 0,8, свидетельствуя о слабом удерживании соединений фосфора в песках литоральной зоны и об относительной их аккумуляции в глубоких частях котловины с Fe-Mn-коллоидами и автохтонным ОВ. Обнаруживаемый «дефицит» $P_{\text{общ}}$ в ДО литоральных участков озер связан не только с гранулометрическим составом покрывающих их отложений, но и с поглощением доступных форм фосфора водными и воздушно-водными растениями, образующими более или менее плотные пояса по периметру водоемов.

Заключение

Озера Чувашской Республики характеризуются широким разнообразием минеральных и органических отложений, имеющих специфические черты в зависимости от генезиса, стадии развития озер и особенностей осадконакопления. В озерах провинции Приволжской возвышенности и региона в целом отмечено преобладание минеральных осадков, формирующихся за счет терригенного стока. Типологический спектр ДО по гранулометрическому составу также широк и изменяется от песков в лито-

ральной зоне озер до глинистых илов в наиболее глубоководных участках ложа. Группа органических осадков характерна для водоемов провинции Низменного Заволжья и Засурского полесского района смешанных лесов Предволжья, где представлена торфогенными и торфянистыми илами и отложениями из макрофитов.

Концентрации органического углерода и азота в ДО водоемов Низменного Заволжья составляют 15,8 и 1,22 %, в озерах Приволжской возвышенности – 3,3 и 0,13 % соответственно. Фосфор в равной мере накапливается в осадках водоемов северной и южной географических провинций Чувашии – 0,19 %.

Природные и антропогенные процессы, совокупно определяющие пространственную и временную динамику интенсивности поступления и накопления вещества в водоемах ЧР, отличает квазистационарный характер: содержание органического углерода, азота и фосфора в пределах верхней метровой осадочной толщи характеризуется относительно постоянной величиной.

Рост биологической продуктивности водоемов Низменного Заволжья ведет к изменению потоков азота и фосфора в направлении их аккумуляции в ДО и снижению внутренней биогенной нагрузки. Отмечаемое в большинстве озер Приволжской возвышенности увеличение концентрации азота в современных отложениях является проявлением нарастающей внешней биогенной нагрузки на водоемы, расположенные на аграрно освоенных территориях.

Литература

Аринushкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 491 с.

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

ГОСТ 26107-84. Почвы. Методы определения общего азота.

References

Arinushkina E. V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Soil chemical analysis guide]. Moscow: MGU, 1961. 491 p.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogennykh elementov v ozernykh ekosistemakh [The role of sediments in the transformation of organic matter and biogenic elements in lake ecosystems]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 35–41.

ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.

ГОСТ 26261-84. Почвы. Методы определения валового фосфора и валового калия.

Законнов В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: Дис. ... докт. геогр. наук. М., 2007. 379 с.

Законнов В. В., Иванов Д. В., Законнова А. В., Кочеткова М. Ю., Маланин В. В., Хайдаров А. А. Пространственная и временная трансформация донных отложений в водохранилищах Средней Волги // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 3. С. 1–9.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И. Органическое вещество и биогенные элементы в донных отложениях озер Республики Татарстан // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов: Сб. науч. тр. междунар. конф. Казань, 2006. С. 169–172.

Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Исследование современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 31–43. doi: 10.17076/lim844

Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Взаимосвязь вещественного состава озерных отложений и антропогенного преобразования природных ландшафтов Республики Татарстан // Экология и промышленность России. 2011. № 6. С. 35–38.

Курдин В. П. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ // Бюл. Ин-та биол. водохр. АН СССР. 1960. № 8–9. С. 57–61.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических систем. М.: Наука, 2010. 243 с.

Новиков Б. И. Донные отложения днепровских водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1985. 172 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

Осмелкин Е. В., Иванов Д. В., Зиганшин И. И. Характеристика гранулометрического состава донных отложений водоемов Предволжья Чувашской Республики // Российский журнал прикладной экологии. 2017. № 4. С. 11–15.

Россолимо Л. Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах. М.: Наука, 1964. С. 5–46.

Физико-географическое районирование Среднего Поволжья / Под ред. А. В. Ступишина. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1964. 197 с.

Поступила в редакцию 09.03.2021

Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Srednego Povolz'ya [Physico-geographical zoning of the Middle Volga Region]. Ed. A. V. Stupishin. Kazan: Kazan university, 1964. 197 p.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution].

GOST 26107-84. Pochvy. Metody opredeleniya obshchego azota [Soils. Methods for determination of total nitrogen].

GOST 26213-91. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva [Soils. Methods for determination of organic matter].

GOST 26261-84. Pochvy. Metody opredeleniya valovogo fosfora i valovogo kaliya [Soils. Methods for determination of total phosphorus and total potassium].

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. Issledovanie sovremennogo i istoricheskogo osadkonakopleniya v vodoemakh Privolzhskoi vozvysshennosti i Nizhnego Zavolzh'ya [A study of contemporary and historical sedimentation in waterbodies of the Volga Upland and the Low-lying Trans-Volga Region]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRS RAS]. 2018. No. 9. P. 31–43. doi: 10.17076/lim844

Ivanov D. V., Shagidullin R. R., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Vzaimosvyaz' veshchestvennogo sostava ozernykh otlozhenii i antropogennogo preobrazovaniya prirodnikh landshaftov Respubliki Tatarstan [Interrelation of the material composition of lake sediments and anthropogenic transformation of the natural landscapes of the Republic of Tatarstan]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2011. No. 6. P. 35–38.

Ivanov D. V., Ziganshin I. I. Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy v donnykh otlozheniyakh ozer Respubliki Tatarstan [Organic matter and biogenic elements in lake sediments of the Republic of Tatarstan]. *Ekologo-gidrol. probl. izucheniya i ispol'zovaniya vodnykh resursov*: Sb. nauch. tr. mezhdunar. konf. [Ecol. and hydrol. probl. of the study and use of water resources: Proceed. int. conf.]. Kazan, 2006. P. 169–172.

Kurdin V. P. O klassifikatsii i proiskhozhdenii gruntov vodokhranilishch [On the classification and origin of reservoir sediments]. *Byul. Inst. biol. vodokhr. AN SSSR*

[Bull. Inst. of Reservoir Biol. USSR Acad. Sci.]. 1960. No. 8–9. P. 57–61.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh system [Sediments as a component of limnic systems]. Moscow: Nauka, 2010. 243 p.

Novikov B. I. Donnye otlozheniya dneprovskikh vodokhranilishch [Sediments of the Dnieper reservoirs]. Kiev: Naukova dumka, 1985. 172 p.

Osmelkin E. V., Ivanov D. V., Ziganshin I. I. Kharakteristika granulometricheskogo sostava donnykh otlozhenii vodoemov Predvolzh'ya Chuvashskoi Respubliki [Sediments particle size characteristics of water bodies in the Volga Upland of the Chuvash Republic]. *Rossiiskii zhurn. priklad. ekol.* [Russ. J. Appl. Ecol.]. 2017. No. 4. P. 11–15.

Ozera Srednego Povolzh'ya [Lakes of the Middle Volga area]. Leningrad: Nauka, 1976. 236 p.

Rossolimo L. L. Osnovy tipizatsii ozer i limnologicheskogo raionirovaniya [Fundamentals of lakes typification and limnological zoning]. *Nakoplenie veshchestva v ozerakh* [Matter accumulation in lakes]. Moscow: Nauka, 1964. P. 5–46.

Zakonov V. V. Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Sedimentation in the Volga cascade reservoirs]: DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow, 2007. 379 p.

Zakonov V. V., Ivanov D. V., Zakonova A. V., Kochetkova M. Yu., Malanin V. V., Khaidarov A. A. Prostranstvennaya i vremennaya transformatsiya donnykh otlozhenii v vodokhranilishchakh Srednei Volgi [Spatial and temporal transformations of sediments in the Middle Volga reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2007. Vol. 34, no. 3. P. 1–9.

Received March 09, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

Осмелкин Евгений Витальевич

директор, к. г. н.
Государственный природный заповедник «Присурский»
пос. Лесной, 9, Чебоксары, Чувашская Республика,
Россия, 428034
эл. почта: pisurskij@mail.ru
тел.: (8352) 414849

Зиганшин Ирек Ильгизарович

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: Irek_Ziganshin@mail.ru
тел.: (843) 2759573

CONTRIBUTORS:

Ivanov, Dmitry

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Osmelkin, Evgenii

Prisurskii State Strict Nature Reserve
9 Lesnoi, 428034 Cheboksary, Chuvash Republic, Russia
e-mail: pisurskij@mail.ru
tel.: (8352) 414849

Ziganshin, Irek

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: Irek_Ziganshin@mail.ru
tel.: (843) 2759573

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 579.68

ЭКОЛОГО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕРА КОМСОМОЛЬСКОЕ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗАЦИИ

О. В. Морозова, Р. П. Токинова, Д. В. Иванов

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан,
Казань, Россия*

На основе показателей бактериопланктона и бактериобентоса проведена оценка экологического состояния озера Комсомольское (г. Казань) в осенне-зимний период. Летом 2019 г. на водоеме осуществлялась расчистка дна озера от иловых отложений, в результате в подледный период 2020 г. наблюдалось значительное улучшение гидрохимических показателей воды по сравнению с таковыми предшествующего года. Качество воды по микробиологическим показателям соответствовало нормативам Росгидромета. В условиях высокой концентрации сульфатов в придонном слое и особенно в донных отложениях происходило активное развитие сульфатредукторов. В подледный период в поверхностном слое воды отмечено развитие пурпурных фототрофных и бесцветных хемолитотрофных сероокисляющих бактерий. При недостатке кислорода в озерной воде возможно массовое развитие пурпурных серобактерий, а также изменение прозрачности и цветности верхнего слоя воды озера. Дополнительная аэрация гидроэкосистемы оз. Комсомольское достаточным количеством кислорода в зимний период способна улучшить гидрохимический состав и эколого-трофическую структуру микробиоценоза. Проведенные исследования являются частью системы наблюдений за водоемами городских территорий с целью разработки программы мер по поддержанию благополучного состояния их экосистем.

Ключевые слова: бактериопланктон; бактериобентос; сульфатредукторы; пурпурные серобактерии; бесцветные серобактерии; эколого-трофическая структура микробиоценоза.

O. V. Morozova, R. P. Tokinova, D. V. Ivanov. ECOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASSESMENT OF LAKE KOMSOMOLSKOYE WATER QUALITY UNDER URBANIZATION

The ecological state of Lake Komsomolskoye (Kazan) in the fall-winter season was evaluated using bacterioplankton and bacteriobenthos indicators. In the summer of 2019, comprehensive actions were taken to clear the lake bottom of silt deposits. As a result, a significant improvement in hydrochemical parameters of the water was observed during

the subglacial period of 2020 compared to the previous year. Indicators of microbial water quality conformed to Roshydromet regulatory requirements. Due to the high sulfate concentration in the bottom layer and especially in the benthos, mass development of sulfate-reducing bacteria took place. During the ice-covered period, purple phototrophic and colorless sulfur bacteria occurred in the surface water layer. Oxygen depletion in lake water can cause mass development of anaerobic purple bacteria, as well as a change in surface water transparency and color. Additional aeration of the Lake Komsomolskoye hydroecosystem with a sufficient amount of oxygen in winter can improve the hydrochemical composition and eco-trophic structure of the microbial community. These studies are part of the system of observations of urban water bodies designed to develop a program of actions for maintaining the ecological well-being of their ecosystems.

Key words: bacterioplankton; bacteriobenthos; sulfate-reducing bacteria; purple sulfur bacteria; colorless sulfur bacteria; eco-trophic structure of the microbial community.

Введение

Процесс естественной эвтрофикации пресноводных водоемов обычно является закономерной последовательностью старения озера, когда происходит повышение биологической продуктивности, обмеление озера и постепенное заболачивание. В природе этот процесс длится тысячи лет. Стоит отметить, что и в наши дни существуют озера, не подверженные антропогенному воздействию, которые за последние 10 тыс. лет стали даже менее продуктивными [Engstrom et al., 2000]. В условиях избыточной нагрузки биогенными элементами наблюдается резкое увеличение биологической продуктивности водных объектов, значительное снижение прозрачности, ухудшение качества воды, быстрое возрастание трофности, т. е. процесс антропогенной эвтрофикации. Антропогенное эвтрофирование происходит достаточно быстро, иногда в течение нескольких десятилетий. С развитием промышленности, ускорением процесса урбанизации, в условиях всевозрастающей нагрузки биогенными элементами отмечается стремительный рост числа эвтрофированных озер [Smith et al., 2006; Smith, Shindler, 2009; Ашихмина и др., 2014].

Озеро Комсомольское в черте г. Казани (микрорайон Дербышки) создано в 1959 году для целей рекреации населения и относится к группе озер антропогенного типа, в которую входят искусственные озера. Городской водоем испытывает постоянную серьезную антропогенную нагрузку, и по санитарно-гигиеническим показателям его вода периодически не удовлетворяет нормативам, что ведет к ограничению хозяйственно-питьевого и культурно-бытового использования водоема. Концентрации растворенных газов и окрашивание верхнего слоя воды в красный цвет в зимний период года входят в число наиболее неудовлетворительных показателей качества воды

в оз. Комсомольское [Иванов и др., 2019; Токина, Сергеев, 2019].

В соответствии с выработанными в ходе комплексных исследований озера в начале 2019 г. (январь–февраль) рекомендациями по улучшению экологической ситуации и предотвращению ущерба водным биологическим ресурсам, летом того же года были проведены мероприятия по расчистке дна от донных отложений и благоустройству береговой зоны.

Известно, что бактериальные сообщества в водных экосистемах представлены огромным разнообразием функциональных групп, способных утилизировать широкий спектр различных соединений, в том числе антропогенного происхождения, и достаточно быстро реагируют на самые незначительные изменения условий окружающей среды. Структура бактериопланктона и бактериобентоса является важным показателем для оценки степени загрязненности любого водоема. Исследование отдельных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса позволяет оценить состояние и прогнозировать развитие экосистемы озера [Дзюбан и др., 2005; РД 52.24.309-2016; Adamovich et al., 2019]. Среди многообразия микроорганизмов, осуществляющих процессы деструкции в воде и донных отложениях водных объектов, выделяют два основных показателя – это общее число бактерий и численность сапрофитных бактерий, а также их соотношение. Кроме того, для оценки уровня сероводородного загрязнения водных объектов определяют общую численность анаэробных сульфатредукторов в составе бактериобентоса [Дзюбан и др., 2005; РД 52.24.309-2016].

Данные об общей численности бактерий и сапрофитов в разнотипных водных объектах стали основой для различных классификаций экологического состояния воды по микробиологическим показателям. Микробиологи-

ческие критерии включены в классификацию загрязнения воды, предложенную в действующих рекомендациях Росгидромета. Эти рекомендации используются в системе государственного мониторинга водных объектов РФ [РД 52.24.309-2016].

Исследование структуры бактериопланктона и бактериобентоса – ведущих редуцирующих звеньев в гидрозкосистемах – является важной задачей для выявления общих закономерностей функционирования водных экосистем, процессов их самоочищения, знание которых позволит прогнозировать дальнейшее их развитие, что особенно актуально для водных объектов урбанизированных территорий.

Целью данного исследования является оценка экологического состояния оз. Комсомольское в подледный период 2019–2020 гг. по микробиологическим показателям – общей численности бактерий, а также по основным эколого-трофическим группам микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса, в особенности тем, которые могут способствовать ухудшению качества воды и изменению ее цветности.

Данная цель предусматривает решение следующих основных задач:

1. Оценить качество воды и экологическое состояние водного объекта по бактериопланктону и бактериобентосу после проведенной комплексной санации.

2. В связи с повышенным содержанием сульфатов в водоеме изучить особенности развития отдельных диагностических групп микро-

организмов, участвующих в процессе самоочищения, а также в круговороте серы.

3. Определить группы микроорганизмов, которые могут способствовать изменению цвета поверхностного слоя воды озера в подледный период.

Полученные данные комплексных микробиологических исследований могут использоваться при экологическом мониторинге для оценки и прогноза состояния водных объектов в условиях городской среды, в частности, в условиях повышенного содержания сульфатов и сероводорода. А также могут найти применение при разработке экологических программ и природоохранных мероприятий.

Материалы и методы

Озеро Комсомольское (55°51'26.75" с. ш. 49°13'37.91" в. д.) имеет длину 320 м, ширину 50 м, площадь водного зеркала в период летней межени 17 294,5 м², объем 34 714,4 м³ (рис. 1). Это небольшой пруд-копань, имеющий почти прямоугольную форму со сглаженными углами. Уровень воды в озере поддерживается с помощью артезианской воды, насыщенной сульфатами, наполнение обычно происходит в начале лета; также питание происходит за счет атмосферных осадков [Иванов и др., 2019]. Площадь водосбора составляет 12,5 км², средняя глубина 2,5 м (максимальная – 4,7 м). По химическому составу вода относится к сульфатно-кальциевому классу, отличается повышенной минерализацией (0,88–0,95 г/дм³), очень высо-

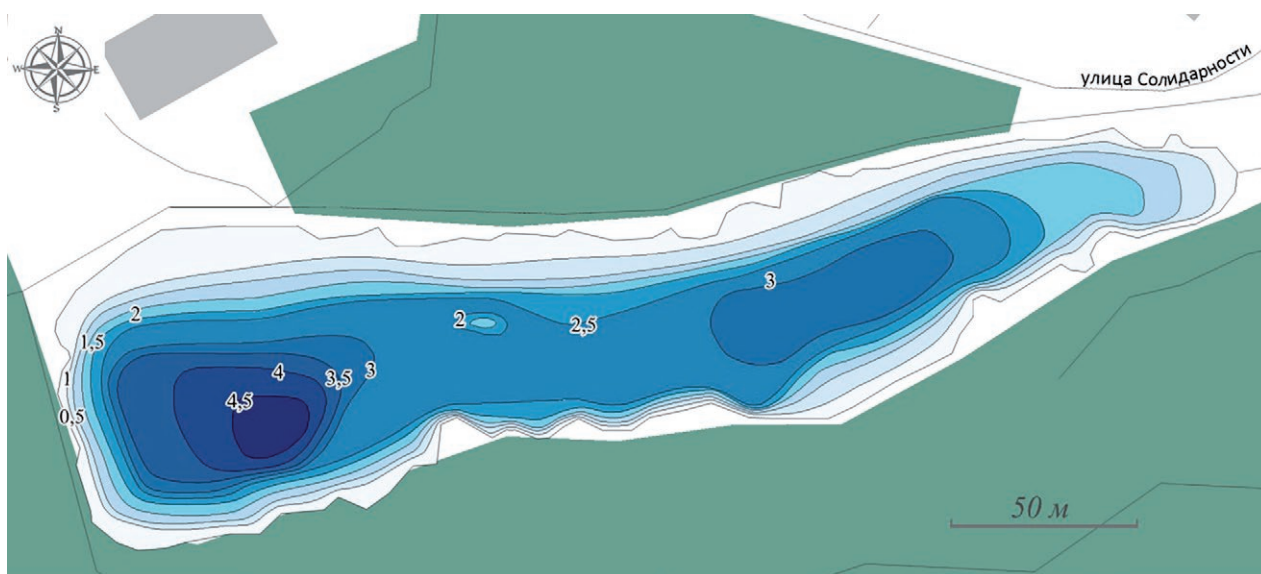


Рис. 1. Озеро Комсомольское, батиметрическая схема с указанными глубинами, м

Fig. 1. Lake Komsomolskoye, bathymetric scheme with indicated depths, m

кой жесткостью (до 15–20 °Ж), близкой к нейтральной реакцией среды [Иванов и др., 2019].

Сульфатный тип вод водозаборной скважины обуславливает накопление в донных отложениях минеральных соединений серы, что в условиях дефицита кислорода в зимний период, а в наиболее глубоких горизонтах в течение всего года, приводит к восстановлению сульфатов до сероводорода и сульфидов. Установлено, что донные отложения озера, представленные исключительно минеральными типами – песками, илистыми песками, песчаными и глинистыми илами, отличаются пластичной консистенцией, темной, местами даже черной окраской и характерным запахом сероводорода. Средняя плотность донных отложений озера составляет 1,48 г/см³ при диапазоне варибельности 1,11–2,20 г/см³. Реакция среды донных отложений варьировала от нейтральной до слабощелочной (в пределах 6,9–8,3) и в среднем составляла 7,6. Характерные для озера кислотно-щелочные условия отложений во многом обязаны хомогенному кальцию, который выпадает из насыщенных им озерных вод и осаждается на дне водоема. В донных отложениях озера установлено превышение фонового содержания свинца, меди, цинка и нефтепродуктов [Иванов и др., 2019].

Химико-аналитические исследования проводились в лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды ИПЭН АН РТ (г. Казань).

Отбор проб выполнялся в октябре 2019 г. и в январе 2020 г. на глубоководном и мелководном участках озера. Точка 1 (т. 1) заложена в наиболее глубокой части озера (глубина 4,7 м); точка 2 (т. 2) – в мелководной части (глубина 2,5 м).

Пробы воды для микробиологического анализа отбирались в стерильные емкости из поверхностного слоя воды на глубине 10 см, согласно [ГОСТ 31942-2012]. Пробы из придонного слоя воды, в 0,5-метровом слое над дном, отбирались для определения особенностей вертикального распределения бактериопланктона. Повторность отбора проб 3-кратная. Пробы донных отложений отбирались в стерильные емкости, согласно [ГОСТ-17.5.01-80].

Для подсчета общего количества бактерий в воде и донных отложениях, когда не нужно было проводить микробиологический посев на питательные среды, в емкости с пробами вносили формалин [ГОСТ 31942-2012].

Одновременно на обоих участках отбирались пробы воды на гидрохимический анализ по показателям: рН, БПК₅, концентрация рас-

творенного кислорода, аммоний, железо, сульфаты, сероводород и сульфиды.

Оценку качества воды проводили путем сравнения фактически обнаруживаемых концентраций с предельно допустимыми для водоемов рыбохозяйственного назначения [Приказ..., 2016].

Эколого-трофическую структуру и разнообразие биоты исследовали, используя показатели бактериопланктона и бактериобентоса: общую численность бактерий, соотношение общей численности бактерий к количеству сапрофитов, численность сапрофитов, олигокарбофилов, железо- и марганецоксилирующих бактерий. Для оценки загрязнения экосистемы сульфатами и сероводородом использовали такие показатели, как численность сульфатредукторов, пурпурных и бесцветных серобактерий.

Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса определяли методом прямого счета на мембранных фильтрах «Владипор» (Россия) с размером пор 0,2 мкм, окрашенных толуидиновым синим [Кузнецов, Дубинина, 1989; Morozova et al., 2012]. Остальные группы микроорганизмов определяли путем посева на селективные питательные среды.

Для определения олигокарбофильных бактерий использовали среду Горбенко следующего состава (г/л): питательный агар 0,5; агар-агар 13,5 [Кузнецов, Дубинина, 1989], для учета сапрофитов – среду СПА [Кузнецов, Дубинина, 1989].

Учитывая особенности и химический состав воды озера, изучали также группы микроорганизмов, участвующие в круговороте серы в водоеме: сульфатредукторы и серобактерии.

Для выявления сульфатредукторов использовали модифицированную среду Баарса с ацетатом натрия и сульфатом железа (г/л): K₂HPO₄ – 0,5; NH₄Cl – 1; NaCl – 1; Na₂SO₃ – 3; CaSO₄ – 1; MgSO₄ · 7H₂O – 2; ацетат натрия – 3,5; дрожжевой экстракт – 1; FeSO₄ – 0,5; Na₂S – 0,05; NaHCO₃ – 1; раствор микроэлементов по Пфеннигу – 1 мл [Кузнецов, Дубинина, 1989; Звягинцев, 1991]. О росте сульфатредуцирующих бактерий судили по образованию черного осадка и почернению среды вдоль пробирки за счет образования сульфида железа.

Пурпурные сероокисляющие бактерии выращивали анаэробно при дневном освещении на среде следующего состава (г/л): NH₄Cl – 0,5; KH₂PO₄ – 0,5; MgCl₂ – 0,2; NaCl – 10; NaHCO₃ – 10; Na₂CO₃ – 5; дрожжевой экстракт – 0,1; ацетат натрия – 0,5; Na₂S – 0,5; цианокобаламин – 20 мкг; раствор микроэлементов по Пфеннигу – 1 мл [Брянцева и др., 2010]. Пур-

пурпурные серобактерии на питательной среде образовывали колонии розового и пурпурного цвета, по мере роста бактерий среда меняла цвет на розовый, а затем бордовый.

Бесцветные сероокисляющие бактерии выращивали аэробно с добавлением в среду тиосульфата натрия в концентрации 0,5 г/л [Брянцева и др., 2010]. За развитием сероокисляющих бактерий следили по накоплению биомассы, образованию характерной белой пленки на поверхности среды, помутнению среды за счет образования серы.

Раствор микроэлементов по Пфеннигу (мг/л): EDTA – 5000; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2000; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 100; MnCl_2 – 30; H_3BO_3 – 300; $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 200; CuCl_2 – 10; NiCl_2 – 20; Na_3MoO_4 – 20 [Брянцева и др., 2010].

Для количественного определения сульфатредукторов и серобактерий в пробах воды и грунта использовали таблицу Мак-Креди [Колешко, 1981].

Выделение железоокисляющих и марганцевоокисляющих бактерий, способных придавать оттенок воде и донным отложениям за счет образования окислов металлов, проводили с помощью диагностических питательных сред. Учет железоокисляющих бактерий проводили на среде следующего состава (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,5; NaNO_3 – 0,5; K_2HPO_4 – 0,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; сахароза – 2; пептон – 1; FeSO_4 – 5,9; агар-агар – 13,5; pH среды составлял 7 [Захарова, Парфенова, 2007]. Рост железоокисляющих бактерий сопровождался накоплением бурых окислов железа, питательная среда также меняла цвет, постепенно окисляясь до ржаво-красного.

Учет марганцевоокисляющих бактерий проводили на среде по: [Захарова, Парфенова, 2007], но вместо сульфата железа вносили MnSO_4 – 4,7 г/л. Рост марганцевоокисляющих бактерий сопровождался накоплением бежево-коричневых окислов марганца, питательная среда также постепенно приобретала бежевый цвет.

Для того чтобы определить отношение данных бактерий к кислороду, бактерии пересеивали методом укола в пробирки с агаризованной средой. Установлено, что у марганцевоокисляющих бактерий наблюдался поверхностный рост, т. е. они являлись аэробами. В верхнем слое агаризованной среды появлялись бежевые колонии, которые со временем темнели. Рост железоокисляющих бактерий отмечался в толще среды вдоль укола, что свидетельствует о микроаэрофильности данной группы бактерий. Рост сопровождался образованием бурых колоний и окрашиванием среды в красный цвет за счет накопления окислов железа.

Экологическое состояние озера оценивалось по показателям бактериопланктона и бактериобентоса. Класс качества воды оценивался по трем показателям: общему количеству бактериопланктона, количеству сапрофитных бактерий, отношению общего количества бактериопланктона и численности сапрофитов согласно классификации качества воды Росгидромет [РД 52.24.309-2016]. Кроме того, экологическое состояние водоема оценивали по шкале экологических модификаций по показателям бактериобентоса: общему количеству бактерий бентоса, численности сапрофитов, соотношению сапрофитов к общему количеству бактерий, а также численности сульфатредукторов [Дзюбан и др., 2005].

Гидрохимические и микробиологические анализы проб делали в трех повторностях. Посев на питательные среды проводили из двух соседних разведений. Для статистической оценки всех полученных данных вычисляли такие показатели, как среднее значение, среднеквадратическое отклонение и доверительный интервал. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета Microsoft Excel для Windows 10.

Результаты

По результатам исследования гидрохимического состава в январе 2020 г. в оз. Комсомольское наблюдалось значительное улучшение качества воды по основным показателям по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. Существенно увеличилась концентрация кислорода у поверхности и у дна. Если в 2019 г. этот показатель был очень низким, в придонном слое воды кислород практически отсутствовал, то в 2020 г. он находился в пределах ПДК_{рб} (предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного назначения). Значение БПК₅ снизилось в пробах воды с глубоководной станции, особенно в придонном слое воды (табл. 1).

Снизилась также концентрации аммония и железа до их значений в пределах ПДК_{рб}. В 2019 г. в водоеме наблюдались высокие концентрации сероводорода и сульфидов, многократно превышающие ПДК_{рб}, в 2020 г. сероводород и сульфиды в водоеме отсутствовали (табл. 1).

Численность бактериопланктона в озере была невысока и незначительно менялась с глубиной (табл. 2). В октябре состояние воды по общему количеству бактериопланктона оценивалось как «слабозагрязненная» (табл. 2), а в январе численность бактериопланктона

Таблица 1. Гидрохимические показатели воды в оз. Комсомольское в январе 2019 и 2020 гг.

Table 1. Hydrochemical indicators of Lake Komsomolskoye water in January 2019 and 2020

Показатель Indicator	Единицы измерения Units	ПДКрб TLVrb	Точка 1 пов. Point 1 surface		Точка 2 пов. Point 2 surface		Точка 1 придон. Point 1 bottom	
			2019	2020	2019	2020	2019	2020
pH	един. units	6,50–8,50	7,40	7,50	7,40	7,70	7,40	7,50
O ₂ раств. O ₂ soluble	мг/л mg/l	> 6	1,20	6,70	1,90	9,30	0	4,90
БПК ₅ BOD ₅	мгО ₂ /дм ³ mgO ₂ /dm ³	2	3,20	2,10	1,31	1,90	10	2,60
Аммоний Ammonium	мг/дм ³ mg/dm ³	0,50	1,31	0,40	1,40	0,30	7	0,42
Сульфат Sulfate	«	100	421	409	416	408	404	416
Железо общ. Iron	«	0,10	0,10	0,06	0,12	0,05	0,15	0,05
Сероводород и сульфиды Hydrogen sulfide and sulfides	«	0,005	0,82	<0,002	1,51	<0,002	9,21	<0,002

снижалась, состояние воды характеризовалось как «условно чистая», только в придонном слое мелководного участка (т. 2) – как «слабо-загрязненная». По численности сапрофитов, которая оставалась низкой в течение всего периода наблюдений, и по соотношению общей численности бактериопланктона к числу сапрофитов, вода классифицировалась как «условно чистая».

Численность олигокарбофильных бактерий, предпочитающих низкие концентрации углеводородных органических соединений, не отличалась значительно от численности сапрофитов в воде озера (табл. 2). Соотношение количества олигокарбофилов к числу сапрофитов в подледный период хотя и было выше единицы и свидетельствовало о способности водоема к самоочищению, но оставалось достаточно низким из-за большого содержания легкоразлагаемой органики в воде озера.

Бактериобентос в октябре находился на уровнях низких значений численности. В январе эти значения увеличивались примерно в 2 раза (табл. 3). По данным показателям экологическое состояние водоема находилось в пределах нормы.

Количество сапрофитов в донных отложениях наиболее глубоководного участка озера (т. 1) было на порядок больше, чем в донных отложениях мелководного участка (т. 2). По этому показателю состояние озера классифицировалось как «состояние риска». По соотношению общего количества сапрофитов к числу бактериобентоса состояние водоема оценивалось в пределах нормы (табл. 3).

В донных отложениях соотношение численности олигокарбофилов и сапрофитов также было низким (табл. 3). В подледный период для глубоководного участка (т. 1) это значение было даже ниже единицы, что указывало на слабые процессы минерализации органики в глубоководной зоне озера из-за низкой обеспеченности кислородом и, соответственно, накопления в донных отложениях легкоминерализуемого органического вещества.

Установлено, что в гидрозкосистеме озера вследствие повышенной концентрации сульфатов развивались сульфатредуцирующие бактерии, особенно в донных отложениях. Пробы донных отложений имели характерные признаки деятельности сульфатредукторов – запах сероводорода и почернение из-за присутствия высоких концентраций осадочного железа. Так, численность сульфатредукторов в донных отложениях была высокой как осенью, так и в подледный период (табл. 3). Экологическое состояние озера согласно шкале экологических модификаций соответствовало уровню «предкризисное состояние». Сульфатредукторы в октябре обнаруживались в поверхностных пробах воды в незначительных количествах, с глубиной их численность возрастала на три порядка. В подледный период численность сульфатредукторов в поверхностных водах озера увеличивалась (табл. 2).

Путем посева на диагностическую питательную среду из грунта удалось выделить сульфатредуцирующие подвижные вибрионы, из водной среды – сульфатредуцирующие па-

Таблица 2. Оценка качества воды оз. Комсомольское по показателям бактериопланктона согласно РД 52.24.309-2016

Table 2. Assessment of Lake Komsomolskoye water quality by bacterioplankton indicators according to RD 52.24.309-2016

Сезон Season	Точка 1, пов. Point 1 surface	Точка 2, пов. Point 2 surface	Точка 1, придон. (4,5–5 м) Point 1 bottom (4.5–5 m)	Точка 2, придон. (2–2,5 м) Point 2 bottom (2–2.5 m)	Степень загрязненности воды (класс качества) Degree of water quality (quality class)
	Общее количество бактериопланктона, 10 ⁶ кл/мл Total number of bacterioplankton, 10 ⁶ cell/ml				
Октябрь October	1,70 ± 0,06	1,34 ± 0,02	2,31 ± 0,05		Слабозагрязн. (II) 1,0–3,0 · 10 ⁶ кл/мл Slightly polluted (II) 1.0–3.0 · 10 ⁶ cell/ml
Январь January	0,96 ± 0,04	0,96 ± 0,07	0,98 ± 0,02	1,17 ± 0,07	Условно чистая (I) <1,0 · 10 ⁶ кл/мл – слабозагрязн. (II) 1,0–3,0 · 10 ⁶ кл/мл Conditionally clean (I) <1.0 · 10 ⁶ cell/ml – Slightly polluted (II) 1.0–3.0 · 10 ⁶ cell/ml
	Общее количество сапрофитов, кл/мл Number of saprophytes, cell/ml				
Октябрь October	680 ± 24	120 ± 7	230 ± 19		Условно чистая (I) <5,0 · 10 ³ кл/мл Conditionally clean (I) <5.0 · 10 ³ cell/ml
Январь January	720 ± 13	150 ± 10	840 ± 25	220 ± 8	Условно чистая (I) Conditionally clean (I)
	Общее количество олигокарбофилов, кл/мл Number of oligocarbophiles, cell/ml				
Октябрь October	250 ± 11	900 ± 46	200 ± 14		
Январь January	1070 ± 37	470 ± 13	1410 ± 54	750 ± 28	
	Соотношение общего количества бактериопланктона к числу сапрофитов, 10 ⁴ Ratio of the number of bacterioplankton to saprophytes, 10 ⁴				
Октябрь October	2,50	1,11	10,00		Условно чистая (I) >10 ³ Conditionally clean (I) >10 ³
Январь January	1,33	6,40	1,16	5,31	Условно чистая (I) Conditionally clean (I)
	Сульфатредукторы*, кл/мл Sulfate-reducing bacteria*, cell/ml				
Октябрь October	2,5	6	2500		
Январь January	250	25	6000	2500	

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: * – наиболее вероятное число микроорганизмов.

Note. Here and in tabl. 3, 4: * – the most likely number of microorganisms

лочки и кокки. Рост сульфатредукторов отмечался не только в виде черного осадка на дне, но и по всей высоте пробирки, что свидетельствует о слабой чувствительности к кислороду данной группы бактерий.

Осенью в оз. Комсомольское бесцветные серобактерии, способные расти в аэробных условиях, отмечены в незначительных количе-

ствах в поверхностных пробах воды, тогда как с глубиной их численность возрастала примерно на 1–2 порядка (табл. 4). В подледный период их количество в поверхностных пробах, напротив, примерно на 1–2 порядка увеличилось. В донных отложениях численность данной группы серобактерий не менялась в зависимости от сезона (табл. 4).

Таблица 3. Оценка экологического состояния оз. Комсомольское по показателям бактериобентоса в соответствии со шкалой экологических модификаций [Дзюбан и др., 2005]

Table 3. Assessment of the Lake Komsomolskoye ecological state by bacteriobenthos indicators according to the scale of environment modifications [Dzyuban et al., 2005]

Сезон Season	Точка 1 Point 1	Точка 2 Point 2	Экологическое состояние озера Ecological state of the lake
	Общее количество бактериобентоса, 10 ⁸ кл/г донных отложений Total number of bacteriobenthos, 10 ⁸ cell/g sediments		
Октябрь October	5,55 ± 0,08	3,81 ± 0,14	Норма 10 ⁷ –10 ⁹ кл/мл Norm 10 ⁷ –10 ⁹ cell/ml
Январь January	11,20 ± 0,55	5,89 ± 0,04	Норма Norm
	Общее количество сапрофитных бактерий, тыс. кл/г донных отложений Number of saprophytes, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	230 ± 18,20	45 ± 1,10	Состояние риска 10 ⁴ –10 ⁵ кл/мл Risk status 10 ⁴ –10 ⁵ cell/ml
Январь January	180 ± 14,50	21 ± 1,70	Состояние риска Risk status
	Общее количество олигокарбофилов, тыс. кл/г донных отложений Number of oligocarbophiles, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	425 ± 17,31	70 ± 2,10	–
Январь January	137 ± 13,40	128 ± 15,12	–
	Соотношение общего количества сапрофитов к числу бактериобентоса Ratio of the number of saprophytes to the number of bacteriobenthos		
Октябрь October	4×10 ⁻⁴	12×10 ⁻⁴	Норма <0,01 Norm <0.01
Январь January	16×10 ⁻⁴	35×10 ⁻⁵	Норма Norm
	Сульфатредукторы*, тыс. кл/г донных отложений Sulfate-reducing bacteria*, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	250	60	Предкризисное состояние 10 ³ –10 ⁵ кл/мл Pre-crisis state 10 ³ –10 ⁵ cell/ml
Январь January	900	300	Предкризисное состояние Pre-crisis state

На диагностической среде при развитии бесцветных серобактерий происходило помутнение среды за счет выделения серы бактериями и образование белой, состоящей из серы, пленки на поверхности среды. Были выделены бесцветные нитчатые серобактерии, морфологически похожие на р. *Thiothrix* и р. *Beggiatoa*.

Фототрофные пурпурные серобактерии в значительных количествах диагностировались в пробах воды и донных отложений

из озера. При этом в подледный период происходили существенные изменения в вертикальном распределении пурпурных серобактерий. Если в октябре пурпурные сероокисляющие бактерии населяли только придонный слой и донные отложения водоема, то зимой они перемещались в поверхностный слой воды, а в донных отложениях и в придонном слое воды их численность снижалась на несколько порядков (табл. 4). Таким образом, пурпур-

Таблица 4. Численность различных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса оз. Комсомольское

Table 4. The number of different microorganisms diagnostic groups in bacterioplankton and bacteriobenthos of Lake Komsomolskoye

Сезон Season	Бактериопланктон Bacterioplankton				Бактериобентос Bacteriobenthos	
	Точка 1, пов. Point 1 surface	Точка 2, пов. Point 2 surface	Точка 1, придон. Point 1 bottom	Точка 2, придон. Point 2 bottom	Точка 1 Point 1	Точка 2 Point 2
	Пурпурные серобактерии*, кл/мл Purple sulfur-oxidizing bacteria*, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	0	0	250		70	0,60
Январь January	12×10 ³	30×10 ³	5	6	0,002	0,06
	Бесцветные серобактерии*, кл/мл Colorless sulfur-oxidizing bacteria*, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	7	13	500		0,10	0,21
Январь January	250	6000	60	13	0,52	0,30
	Железоокисляющие / марганцеокисляющие бактерии, кл/мл Iron-oxidizing bacteria / manganese-oxidizing bacteria, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	0/0	0/0	0/0		0/0,04	2,76/0,23
Январь January	0/0	0/0	0/0		0/0,18	5,18/0,19

ные серобактерии в подледный период активно развивались в водной толще озера, где они осуществляли фотосинтез, продуцировали органическое вещество и окисляли сероводород до серы и сульфатов. Увеличение их численности в поверхностном слое подо льдом обусловлено потребностью в дневном свете для осуществления фотосинтеза [Нетрусов, Котова, 2006].

На диагностической питательной среде пурпурные фототрофные серобактерии образовывали колонии розового, бордового, коричневого цветов, при этом происходило окрашивание питательной среды сначала в светло-розовый, затем в бордовый цвет.

В воде озера не удалось обнаружить железоокисляющие и марганцеокисляющие бактерии. В подледный период они обнаружены в небольших количествах лишь в донных отложениях (табл. 4), где развивались в микроаэрофильных условиях и численность их не была высокой.

Обсуждение

Физико-химические факторы, такие как рН, температура, освещенность, содержание сероводорода, сульфатов и др., опреде-

ляют разнообразие микробных сообществ гидрозкоcosystemы.

Химико-аналитические исследования, проведенные в январе и феврале 2019 г., показали, что содержание растворенного в воде кислорода существенно ниже нормативных значений. Вместе с тем в воде в высоких концентрациях, как у дна, так и в поверхностном слое, были отмечены сульфиды и сероводород. Многократное превышение ПДК по этому показателю, по-видимому, послужило одним из основных факторов массовой гибели ихтиофауны в водоеме [Токинова, Сергеев, 2019]. В 2020 году после проведения комплексных мероприятий по расчистке дна и благоустройству береговой зоны мы наблюдали значительные улучшения гидрохимических показателей воды озера (табл. 1).

Несмотря на то что в подледный период содержание кислорода в воде уже соответствовало норме, а сульфиды и сероводород отсутствовали, сульфатредукторы и пурпурные фототрофные серобактерии были обнаружены как в донных отложениях, так и в водной толще. Массовое развитие сульфатредукторов указывало на неблагоприятное экологическое состояние водоема и загрязненность гидрозкоsystemы сульфатами. Согласно шкале экологи-

ческих модификаций, где представлена оценка экологического состояния водных объектов по показателям бактериобентоса, состояние изучаемого водоема характеризовалось как «предкризисное». Качество воды по микробиологическим показателям соответствовало нормативам Росгидромета, но из-за высокой численности сульфатредукторов в донных отложениях экологическое состояние озера Комсомольское оставалось неблагоприятным.

Считается, что сульфатредукторы относятся к строгим анаэробам, рост которых ингибируется в присутствии кислорода. Однако не все представители данной группы быстро погибают в окислительных условиях, многие из них обладают аэротолерантностью [Grein et al., 2013; Брюханов и др., 2016]. Существуют различные способы защиты от окислительных стрессов. Например, сульфатредуцирующие бактерии часто формируют консорциумы и колонии вместе с фототрофными серобактериями, которые уменьшают доступ к ним кислорода, а сульфатредукторы, в свою очередь, поставляют сероводород, являющийся субстратом для роста сероокисляющих бактерий [Dolla et al., 2006]. Поэтому в водных горизонтах, населенных пурпурными серобактериями, часто можно наблюдать высокую численность жизнеспособных клеток сульфатредукторов [Саввичев и др., 2014].

Фотоавтотрофные пурпурные сероокисляющие бактерии осуществляют фотосинтез в бескислородных условиях. Клетки этих серобактерий содержат бактериохлорофилл и каротиноиды, которые придают им соответствующую окраску [Лунина и др., 2014]. Они способны окислять не только сероводород, но и восстановленные органические вещества, используя в качестве доноров электронов не воду, как при аэробном фотосинтезе, а восстановленные соединения серы и железа, а также водород [Нетрусов, Котова, 2006]. Некоторые представители могут окислять тиосульфат и сульфид, накапливая в своих клетках элементарную серу, в условиях как аэробноза, так и анаэробноза [Гриднева и др., 2009]. При массовом развитии пурпурные сероокисляющие бактерии образуют скопления, способные окрашивать определенные слои водоемов в разные оттенки пурпурного цвета, особенно в мелководных прудах [Горбунов, Уманская, 2014].

При культивировании на селективных питательных средах было установлено, что пурпурные серобактерии обладали устойчивостью к кислороду, поскольку их рост отмечен не только на дне, но и вдоль всей пробирки. Известно, что многие серобактерии способны

расти в микроаэрофильных условиях и толерантны к высоким концентрациям кислорода [Madigan, Jung, 2009]. Дыхание и фотосинтез у бактерий – два конкурирующих процесса, и при возможности выбора клетки предпочитают энергию света. При микроскопировании с фазовым контрастом наблюдались овальные почкующиеся отдельные клетки и микроколонии пурпурных серобактерий, окрашенных, за счет наличия в них фотосинтетических пигментов, в различные оттенки пурпурного цвета.

В зимний период пурпурные серобактерии перемещались в подледный слой воды, что связано с их потребностью в энергии солнечного света для осуществления фотосинтеза, а также способностью к росту в присутствии кислорода. Но численность данной группы бактерий была недостаточно высокой, чтобы повлиять на окраску воды, возможно, из-за хорошего кислородного режима подо льдом озера.

Следует отметить, что в условиях недостатка кислорода в подледный период возможно массовое развитие пурпурных серобактерий, осуществляющих фотосинтез и активно потребляющих сероводород, поставляемый в больших количествах сульфатредуцирующими бактериями (рис. 2). Активное развитие пурпурных серобактерий может являться причиной часто наблюдаемого на озере изменения окраски верхних слоев воды.

К сероокисляющим бактериям также относятся хемолитотрофные бесцветные серобактерии, которые окисляют соединения серы с использованием кислорода аэробно. Их называют бесцветными серобактериями для того, чтобы отличить от пигментированных фототрофных серобактерий [Kim, Gadd, 2008]. Развитие данной группы бактерий всегда благоприятно для водоемов, загрязненных сероводородом и сульфидами. Бесцветные серобактерии играют важную роль в гидрозокосистемах, развиваются при наличии достаточного количества кислорода и сероводорода в среде обитания, они способны быстро удалять сульфиды из окружающей среды за счет высокой скорости их окисления, многие бактерии могут окислять сероводород до элементарной серы, накапливая серу внутри или вне своих клеток [Robertson, Kuenen, 2006].

Известно, что за изменение цвета воды в водоемах (появление ржавого цвета воды или ила) часто ответственны железooksисляющие и марганецooksисляющие бактерии, которые, кроме того, являются индикаторами загрязнения экосистемы тяжелыми металлами, а также играют важную роль в круговороте железа и марганца [Нетрусов, Котова, 2006; Нгун

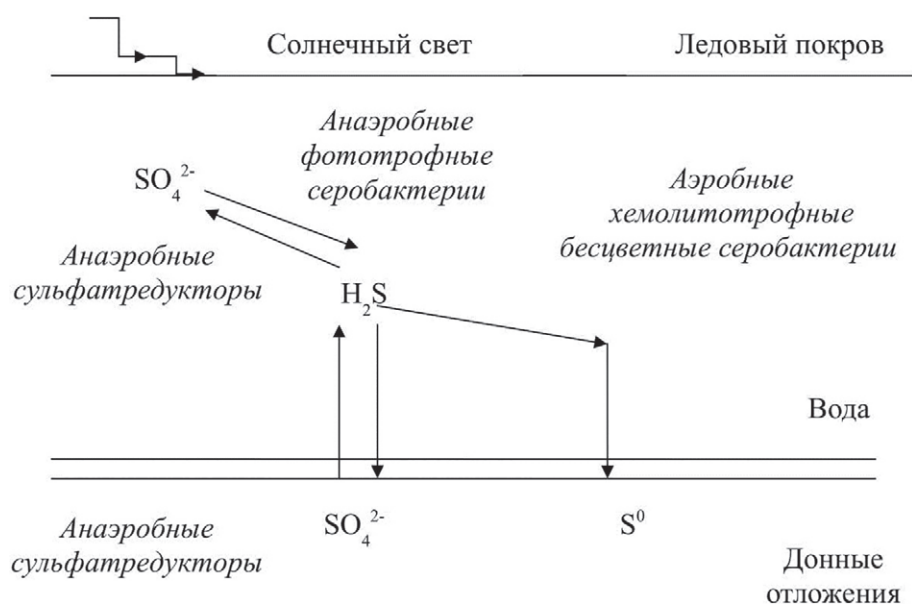


Рис. 2. Группы микроорганизмов, участвующие в циркуляции серы в экосистеме озера Комсомольское

Fig. 2. Groups of microorganisms involved in the sulfur circulation in the Lake Komsomolskoye ecosystem

и др., 2014]. Микроорганизмы осуществляют окисление железа как в аэробных, так и в анаэробных условиях. В большинстве случаев способность бактерий окислять железо сочетается с использованием энергии окисления молекулярной и сульфидной серы [Kapler, Newman, 2004].

В результате проведенных исследований удалось установить, что, несмотря на низкую численность железоокисляющих и марганец-окисляющих бактерий, они осуществляли окисление железа в условиях недостатка кислорода. Численность их была невысокой для формирования красного илистого налета из окисла железа на поверхности донных отложений в подледный период.

В условиях сильного дефицита кислорода и переизбытка сульфатов в гидроэкосистеме озера активный рост сульфатредуцирующих бактерий может привести к загрязнению водоема сероводородом, массовому развитию анаэробных пурпурных серобактерий, в результате возможно окрашивание верхних слоев воды озера и дальнейшее повышение концентрации сульфатов (рис. 2).

Благоприятный кислородный режим в озере в подледный период будет способствовать подавлению роста сульфатредукторов, пурпурных фототрофных серобактерий и развитию участвующих в процессе самоочищения аэробных микроорганизмов, в том числе бесцветных серобактерий.

Заключение

Для гидроэкосистемы озера Комсомольское в условиях насыщенности воды сульфатами характерно наличие сульфатредуцирующих и сероокисляющих бактерий в составе бактериопланктона и бактериобентоса.

После проведения комплексных мероприятий по расчистке дна от донных отложений и благоустройству береговой зоны наблюдалось значительное улучшение качества воды по гидрохимическим показателям.

По микробиологическим показателям вода в поверхностном и придонном слое оценивалась как «условно чистая» – «слабозагрязненная», т. е. I–II класса качества согласно классификации Росгидромета. В воде озера наблюдалось достаточно однородное вертикальное распределение бактериопланктона [РД 52.24.309-2016].

В придонном слое и особенно в донных отложениях развивались сульфатредукторы и создавались благоприятные условия для развития сероокисляющих бактерий, главных потребителей сероводорода. В подледный период происходило вертикальное перераспределение численности пурпурных фотосинтезирующих сероокисляющих бактерий в гидроэкосистеме озера. Если осенью пурпурные серобактерии заселяли лишь донные отложения и придонный слой воды, то в подледный период основная масса этой группы бактерий

перемещалась из донных отложений в поверхностный слой воды, что связано с их слабой чувствительностью к кислороду и необходимостью использовать солнечный свет для осуществления фотосинтеза.

В составе бактериобентоса была повышена численность сапрофитов, что свидетельствовало о присутствии легкоминерализуемого органического вещества в донных отложениях водоема. Экологическое состояние озера, согласно шкале экологических модификаций, оценивалось как «предкризисное» из-за высокой численности сульфатредукторов в донных отложениях.

В условиях низких концентраций кислорода в присутствии сульфатов в гидрозкосистеме озера активное развитие сульфатредуцирующих бактерий приведет к повышению концентрации сероводорода. Высокие концентрации сероводорода и металлов при низких концентрациях кислорода крайне благоприятны для массового развития анаэробных пурпурных серобактерий и окрашивания воды в оттенки пурпурного цвета, что неоднократно отмечалось на озере.

Для экосистемы оз. Комсомольское в подледный период крайне важно наличие достаточных концентраций растворенного кислорода, что положительно отразится на гидрохимическом режиме и будет способствовать подавлению роста анаэробных сульфатредукторов, а также развитию аэробных микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды ИПЭН АН РТ (г. Казань) Н. В. Шурмину и Л. К. Галиахметову за помощь в проведении химико-аналитических измерений.

Литература

Ашихмина Т. Я., Кутявина Т. И., Домнина Е. А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоемов (литературный обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 6–13.

Брюханов А. Л., Корнеева В. А., Динарева Т. Ю., Каранчук О. В., Нетрусов А. И., Пименов Н. В. Компоненты антиокислительных систем в клетках аэротолерантных сульфатредуцирующих бактерий рода *Desulfovibrio* (штаммы A2 и TomC), выделенных из отходов добычи металлов // Микробиология. 2016. Т. 85, № 6. С. 625–634. doi: 10.7868/S0026365616060045

Брянцева И. А., Турова Т. П., Ковалева О. Л., Кострикина Н. А., Горленко В. М. Новая крупная алка-

лофильная пурпурная серобактерия *Ectothiorhodospira magna* sp. nov. // Микробиология. 2010. Т. 79, № 6. С. 782–792.

Горбунов М. Ю., Уманская М. В. Массовое развитие пурпурной серной бактерии *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 в небольшом городском озере Дачное (г. Тольятти, Самарская область) // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16, № 5(5). С. 1722–1725.

ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов, 1980. 5 с.

ГОСТ 31942-2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. М.: Стандартинформ, 2013. 28 с.

Гриднева Е. В., Грабович М. Ю., Дубинина Г. А., Черноусова Е. Ю., Акимов В. Н. Экофизиология литотрофных сероокисляющих представителей рода *Sphaerotilus* – обитателей сульфидных источников Северного Кавказа // Микробиология. 2009. Т. 78, № 1. С. 89–97.

Дзюбан А. Н., Косолапов Д. Б., Кузнецова И. А. Микробиологические процессы в донных отложениях Рыбинского водохранилища и озера Плещеево как факторы формирования качества водной среды // Гидробиологический журнал. 2005. Т. 41, № 4. С. 82–88.

Захарова Ю. Р., Парфенова В. В. Метод культивирования микроорганизмов, окисляющих железо и марганец в донных осадках оз. Байкал // Изв. РАН. Сер. биол. 2007. № 3. С. 290–295.

Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. 304 с.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Валиев В. С., Хасанов Р. Р., Маланин В. В., Марасов А. А., Шамаев Д. Е., Паймикина Э. Е. Характеристика донных отложений озера Комсомольское // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. Ч. 2. С. 93–98.

Колешко О. И. Экология микроорганизмов почвы: Лаб. практикум. Минск: Высш. шк., 1981. 176 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Лунина О. Н., Саввичев А. С., Кузнецов Б. Б., Пименов Н. В., Горленко В. М. Аноксигенные фототрофные бактерии стратифицированного озера Кисло-Сладкое (Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2014. Т. 83, № 1. С. 90–108. doi: 10.7868/S002636561401008X

Нгун К. Т., Плешаков Е. В., Решетников М. В., Кузнецов В. В. Использование микробиологических показателей в эколого-почвенном мониторинге города Медногорска // Изв. Саратов. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 55–60.

Нетрусов А. И., Котова И. Б. Микробиология. М.: Академия, 2006. 352 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций

вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». М.: Минсельхоз РФ, 2016. 153 с.

РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2016. 100 с.

Саввичев А. С., Лунина О. Н., Русанов И. И., Захарова Е. Е., Веслополова Е. Ф., Иванов М. В. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Микробиология. 2014. Т. 83, № 2. С. 191–203. doi: 10.7868/S002636561401011X

Токинова П. П., Сергеев А. С. О причинах массовой гибели рыбы в озере Комсомольское (г. Казань) // Чистая вода. Казань: Сб. трудов X Специализ. выставки и Конгресса (Казань, 17–19 окт. 2019 г.). Казань, 2019. С. 119–122.

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring // Ecol. indicators. 2019. Vol. 97. P. 120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049

Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria // J. Biotechnol. 2006. Vol. 126, no. 1. P. 87–100. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.03.041

Engstrom D. R., Fritz S. C., Almendinger J. E., Juggins S. Chemical and biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain // Nature. 2000. Vol. 408. P. 161–166. doi: 10.1038/35041500

Grein F., Ramos A. R., Venceslau S. S., Pereira I. A. Unifying concepts in anaerobic respiration: insights from

dissimilatory sulfur metabolism // Biochim. Biophys. Acta. 2013. Vol. 1827, no. 2. P. 145–160. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.09.001

Kapler A., Newman D. K. Formation of Fe (III) – minerals by Fe (II) – oxidizing photoautotrophic bacteria // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. Vol. 68, no. 6. P. 1217–1226. doi: 10.1016/j.gca.2003.09.006

Kim B. H., Gadd G. M. Bacterial physiology and metabolism. New-York: Cambridge University Press, 2008. P. 408–481. doi: 10.1017/CBO9780511790461.013

Madigan M. T., Jung D. O. An overview of purple bacteria: systematic, physiology and habitat / Eds. C. N. Hunter, F. Daldal, M. C. Thurnauer, J. T. Beatty. Dordrecht: Springer Academic Publ., 2009. P. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_1

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in mesocosms contaminated with phosphate and nitrate // World Appl. Sci. J. 2012. Vol. 19, no. 1. P. 12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182

Robertson L. A., Kuenen J. G. The Prokaryotes / Eds. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, E. Stackebrandt. New-York: Springer-Verlag, 2006. P. 985–1011. doi: 10.1007/0-387-30742-7_31

Smith V. H., Joe S. B., Howarth R. W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystem // Limnol. Oceanogr. 2006. Vol. 51, no. 1. P. 351–355. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351

Smith V. H., Shindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? // Trends in ecology and evolution. 2009. Vol. 24. P. 201–207. doi: 10.1016/j.tree.2008.11.009

Поступила в редакцию 14.10.2021

References

Ashikhmina T. I., Kutyavina T. I., Domnina E. A. Izuchenie protsessov evtrofikatsii prirodnykh i iskusstvenno sozdannykh vodoemov (literaturnyi obzor) [Studying the processes of natural and man-made reservoirs eutrophication (a review)]. *Teor. i priklad. ekol.* [Theoretical and Appl. Ecol.]. 2014. Vol. 3. P. 6–13.

Bryukhanov A. L., Korneeva V. A., Dinareva T. Yu., Karanchuk O. V., Netrusov A. I., Pimenov N. V. Komponenty antiokislitel'nykh sistem v kletkakh aerotolerantnykh sul'fatredutsiruyushchikh bakterii roda *Desulfovibrio* (shtammy A2 i TomC), vydelennykh iz otkhodov dobychi metallov [Components of antioxidant systems in the cells of aerotolerant sulfate-reducing bacteria of the genus *Desulfovibrio* (strain A2 and TomC), isolated from metal mining waste]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2016. Vol. 85, no. 6. P. 625–634. doi: 10.7868/S0026365616060045

Bryantseva I. A., Tourova T. P., Kostrikina N. A., Gorlenko V. M., Kovaleva O. L. Novaya krupnaya alkalofil'naya purpurnaya serobakteriya *Ectothiorhodospira magna* sp. nov. [*Ectothiorhodospira magna* sp. nov., a new large alkaliphilic purple sulfur bacterium]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2010. Vol. 79, no. 6. P. 780–790.

Dzyuban A. N., Kosolapov D. B., Kuznetsova B. B. Mikrobiologicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilishcha i ozera Pleshcheevo kak faktory formirovaniya kachestva vodnoi sredy [Microbiological processes in bottom sediments of Rybinsk reservoir and Lake Pleshevo as factors in formation of the quality of aquatic environment]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 2005. Vol. 41, no. 4. P. 82–88.

Gorbunov M. Yu., Umanskaya M. V. Massovoe razvitiye purpurnoi sernoi bakterii *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 v nebol'shom gorodskom ozere Dachnoe (g. Tol'yatti, Samarkaya oblast') [Mass development of purple sulfur bacteria *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 in a small town Lake Dachnoe (Tolgiatti, Samara region)]. *Izvestiya Samarskogo NC RAN* [Izvestia RAS SamSC]. 2014. Vol. 16, no. 5(5). P. 1722–1725.

GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagriaznennost' [GOST 17.1.5.01-80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling bottom sediments of water bodies for contamination analysis]. Moscow: Izd-vo standartov, 1980. 5 p.

GOST 31942-2012. Voda. Otbor prob dlya mikrobiologicheskogo analiza [GOST 31942-2012. Water. Sampling for microbiological analysis]. Moscow: Standartinform, 2013. 28 p.

Gridneva E. V., Grabovich M. Yu., Dubinina G. A., Chernousova E. Yu., Akimov V. N. Ekofiziologiya litotrofnykh serookislyayushchikh predstavitelei roda *Sphaerotilus* – obitatelei sul'fidnykh istochnikov Severnogo Kavkaza [Ecophysiology of lithotrophic sulfur-oxidizing representatives of the genus *Sphaerotilus* – inhabitants of sulfide sources of the North Caucasus]. *Microbiol. [Microbiol.]*. 2009. Vol. 78, no. 1. P. 89–97.

Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Valiev V. S., Khasanov R. R., Malanin V. V., Marasov A. A., Shamaev D. E., Paimikina E. E. Kharakteristika donnykh otlozhenii oze- ra Komsomol'skoe [Sediments characteristics of Lake Komsomolskoye]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya*: Mater. II mezhdunar. konf. (Kazan 19–24 maya 2019 g.) [Lakes of Eurasia: Problems and solutions: Proceed. II int. conf. (Kazan, May 19–24, 2019)]. Kazan, 2019. Part II. P. 93–98.

Koleshko O. I. Ekologiya mikroorganizmov pochvy: Laboratornyi praktikum [Ecology of microorganisms of soil: Laboratory practice]. Minsk: Vyssh. shk., 1981. 175 p.

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov [Methods for studying water microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p.

Lunina O. N., Savichev A. S., Kuznetsov B. B., Pimenov N. V., Gorlenko V. M. Anoksigennyye fototrofnyye bakterii stratifitsirovannogo ozera Kislo-Sladkoe (Kandalakshskii zaliv Belogo morya) [Anoxygenic phototrophic bacteria of the stratified Lake Kislo-Sladkoe (White Sea, Kandalaksha Bay)]. *Microbiol. [Microbiol.]*. 2014. Vol. 83, no. 1. P. 90–108. doi: 10.7868/S002636561401008X

Ngun C. T., Pleshakov E. V., Reshetnikov M. V., Kuznetsov V. V. Ispol'zovanie mikrobiologicheskikh pokazatelei v ekologo-pochvennom monitoringe goroda Mednogorska [The use of microbial indicators in environmental soil monitoring of the city of Mednogorsk]. *Izv. Sarat. un-ta. Ser. Nauki o Zemle* [Proceed. Saratov Univ. Ser. Earth Sci.]. 2014. Vol. 14, no. 1. P. 55–60.

Netrusov A. I., Kotova I. B. Mikrobiologiya [Microbiology]. Moscow: Akademiya, 2006. 352 p.

Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 13.12.2016 g. #552 "Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya" [Order of the Ministry of agriculture of the Russian Federation No. 552 dated 13.12.2016 On approval of water quality standards for fisheries water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fisheries water bodies]. Moscow: Minsel'khoz RF, 2016. 153 p.

RD 52.24.309–2016. Rukovodyashchii dokument. Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudeni- i za zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushi [RD 52.24.309–2016. Guidance document. Organization and carrying out of routine observations of pollution of surface waters of the land]. Rostov-na-Donu: Roshydromet, 2016. 100 p.

Savichev A. S., Lunina O. N., Rusanov I. I., Zakharova E. E., Veslopolova E. F., Ivanov M. V. Mikrobiologicheskie i izotopno-geokhimicheskie issledovaniya ozera Kislo-Sladkoe meromikticheskogo vodoema na poberezh'e Kandalakshskogo zaliva Belogo morya [Microbiological and isotopic geochemical investigation of Lake Kislo-Sladkoe, a meromictic water body at the Kandalaksha Bay Shore (White Sea)]. *Mikrobiol. [Microbiol.]*. 2014. Vol. 83, no. 2. P. 191–203. doi: 10.7868/S002636561401011X

Tokinova R. P., Sergeev A. S. O prichinakh mas-sovoi gibeli ryby v ozere Komsomol'skoe (g. Kazan') [On the reasons for the mass death of fish in Lake Komsomolskoye (Kazan)]. *Chistaya voda. Kazan': Sb. trudov X Specializ. vystavki i Kongressa (Kazan', 17–19 oct. 2019 g.)* [Pure Water. Kazan: Abs. X conf. and congress (Kazan, Oct. 17–19, 2019)]. Kazan, 2019. P. 119–122.

Zakharova Yu. R., Parfenova V. V. Metod kul'tivirovaniya mikroorganizmov, okislyayushchikh zhelezo i manganets v donnykh osadkakh oz. Baikal [The method of cultivation of microorganisms that oxidize iron and manganese in the bottom sediments of Lake Baikal]. *Izv. RAN. Ser. Biol. [Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.]*. 2007. No. 3. P. 290–295.

Zvyagintsev D. G. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow: MGU, 1991. 304 p.

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring. *Ecol. indicators*. 2019. Vol. 97. P. 120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049

Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria. *J. Biotechnol.* 2006. Vol. 126, no. 1. P. 87–100. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.03.041

Engstrom D. R., Fritz S. C., Almendinger J. E., Juggins S. Chemical and biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain. *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 161–166. doi: 10.1038/35041500

Grein F., Ramos A. R., Venceslau S. S., Pereira I. A. Unifying concepts in anaerobic respiration: insights from dissimilatory sulfur metabolism. *Biochim. Biophys. Acta*. 2013. Vol. 1827, no. 2. P. 145–160. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.09.001

Kapler A., Newman D. K. Formation of Fe (III) – minerals by Fe (II) – oxidizing photoautotrophic bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, no. 6. P. 1217–1226. doi: 10.1016/j.gca.2003.09.006

Kim B. H., Gadd G. M. Bacterial physiology and metabolism. New-York: Cambridge University Press, 2008. P. 408–481. doi: 10.1017/CBO9780511790461.013

Madigan M. T., Jung D. O. An overview of purple bacteria: systematic, physiology and habitat. Dordrecht: Springer Academic Publ., 2009. P. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_1

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in meso-

cosms contaminated with phosphate and nitrate. *World Appl. Sci. J.* 2012. Vol. 19, no. 1. P. 12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182

Robertson L. A., Kuenen J. G. The Prokaryotes. New-York: Springer-Verlag, 2006. P. 985–1011. doi: 10.1007/0-387-30742-7_31

Smith V. H., Joe S. B., Howarth R. W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystem. *Lim-*

nol. Oceanogr. 2006. Vol. 51, no. 1. P. 351–355. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351

Smith V. H., Shindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in ecology and evolution.* 2009. Vol. 24. P. 201–207. doi: 10.1016/j.tree.2008.11.009

Received October 14, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Морозова Ольга Владимировна

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: oollggaa@mail.ru
тел.: +79869063753

Токинова Римма Петровна

заведующая лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: r.token@rambler.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Morozova, Olga

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: oollggaa@mail.ru
tel: +79869063753

Tokinova, Rimma

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: r.token@rambler.ru

Ivanov, Dmitry

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: water-rf@mail.ru

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 551.8:556.55 (470.22)

ДИНАМИКА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И РАЗВИТИЯ ОЗЕРА ОКУНЬОЗЕРО В ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЕ И ГОЛОЦЕНЕ (ПО МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

Т. С. Шелехова, Ю. С. Тихонова, О. В. Лазарева

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Для уточнения условий деградации последнего оледенения в невскую (сямозерскую) стадию в Южной Карелии, выявления влияния климата на изменения окружающей среды проведены исследования донных отложений озера Окуньозеро, расположенного перед сямозерскими краевыми образованиями. Палеогеографические реконструкции основаны на изучении осадков озера с использованием комплексного подхода, включающего спорово-пыльцевой, диатомовый и радиоуглеродный (^{14}C) анализы. Получены новые данные об особенностях отложений позднеледниковья, экологических условиях и динамике развития прогляциального приледникового водоема, непосредственно контактирующего с краем ледника, а также окружающей его растительности. В позднеледниковых отложениях впервые выявлено более 30 видов и разновидностей переотложенных морских диатомовых водорослей. Такого количества ранее не отмечалось в изученных разрезах этого времени. Отделение озера от приледникового водоема произошло в конце позднего дриаса. Прослежена его эволюция после отделения от пра-Онеги, выделены этапы развития и палеогеографические условия окружающей территории. Выполнена реконструкция динамики растительности с аллереда до современности. В позднеледниковье территорию исследования занимали тундровые ерничково-зеленомошные, поlyingно-маревые перигляциально-степные и лесотундровые палеосообщества. В пребореале появились березовые леса с примесью сосны и лугоподобные крупнотравные сообщества. В бореальное время распространились светлохвойные сосновые леса с меньшим количеством березы, которые в атлантическом периоде сменились сосново-еловыми лесами с участием широколиственных пород. С суббореала на территории исследования преобладающими становятся еловые и елово-сосновые леса. Отмечено отсутствие диатомовых водорослей в отдельных горизонтах почти в каждом палеоклиматическом периоде и указаны возможные причины, объясняющие данные перерывы.

Ключевые слова: позднеледниковье; голоцен; донные отложения; спорово-пыльцевой анализ; диатомовый анализ; Южная Карелия.

T. S. Shelekhova, Yu. S. Tikhonova, O. V. Lazareva. LATE GLACIAL AND HOLOCENE NATURAL ENVIRONMENT DYNAMICS AND EVOLUTION OF LAKE OKUNOZERO, SOUTH KARELIA: MICROPALAEONTOLOGICAL DATA

Bottom sediments from Lake Okunozero, located in front of Syamozero marginal formations, were analyzed to better understand the degradation conditions of the Last Glaciation in South Karelia at the Neva (Syamozero) stage and to assess the effect of climate on environmental changes. Paleogeographic reconstructions are based on the study of lake sediments using an integrated approach, which comprises spore-and-pollen, diatom and radiocarbon (^{14}C) analyses. More evidence was obtained for the Late Glacial deposition pattern, the environmental conditions and evolution dynamics of the proglacial ice lake directly contacting the ice margin and of vegetation in that period. For the first time, Late Glacial sediments were found to contain over 30 redeposited marine diatom alga species and varieties, not reported earlier from rock sequences of that period. The lake separated from the periglacial water body at the end of the Late Dryas. Its evolution after separation from the proto-Onega was traced, evolution stages were recognized, and more light on was shed the paleogeographic conditions in the surrounding area. The vegetation dynamics from the Alleröd to the present day was reconstructed. In the Late Glacial Period the study area was occupied by tundra dwarf birch-true moss, sagebrush-wormwood periglacial-steppe and forest-tundra paleocommunities. Meadow-like tall-herb communities and birch forests with an admixture of pine appeared in the Preboreal. In the Boreal time, light-coniferous pine forests with an admixture of birch occupied the area, to be replaced in the Atlantic period by pine-spruce forests with the participation of broad-leaved species. Since the Subboreal, spruce and pine-spruce forests have prevailed in the study area. We observed that diatoms were missing from some horizons in almost every paleoclimatic period and suggested possible explanations for these gaps.

Keywords: Late Glacial; Holocene; bottom sediments; spore-pollen analysis; diatom analysis; South Karelia.

Введение

Процессы, происходившие в позднеледниковые в приледниковых водных бассейнах, изучались в Карелии по многочисленным разрезам донных осадков малых озер, входивших в состав Онежского приледникового озера (ОПО) [Шелехова и др., 2004, 2005; Демидов, 2005, 2006; Филимонова, Шелехова, 2005; Зобков и др., 2016; Шелехова, Субетто, 2016 и др.]. Однако до сих пор не было сведений о времени развития водоема в прогляциальную стадию, когда он непосредственно контактировал с ледниковым краем, где вместе с поступающими в него осадками происходило переотложение микрофоссилий из мореносодержащего льда. Исследуемое Окуньозеро расположено в пределах западной границы Онежского приледникового водоема. Развитие котловины Онежского озера в позднеледниковые известно по различным моделям: М. Н. Порывкина [1960], Г. С. Бискэ [Бискэ и др., 1971], Д. Д. Квасова [1976], М. Saarnisto [Saarnisto et al., 1995], И. Н. Демидова [2004, 2005, 2006]. В настоящее время получена модель развития ОПО с применением современных ГИС-технологий [Субетто и др., 2019].

Несмотря на многочисленность имеющихся разрезов донных отложений для всего побе-

режья Онежского озера [Субетто и др., 2017], в пределах границ невской (сямозерской) стадии методом спорово-пыльцевого анализа с применением радиоуглеродного датирования базальных органогенных слоев изучено всего два разреза. В оз. Суярлампи органогенные осадки начали формироваться $11\,200 \pm 200$ (^{14}C) л. н., TA-1827; в оз. Гурвич – $10\,300 \pm 120$ (^{14}C) л. н., TA-1582 [Заключительный..., 1996; Демидов, 2005; Лаврова, 2005]. В бассейне оз. Сямозеро и р. Шуи по ряду разрезов из болотных массивов выполнены реконструкции палеорастительности начиная с пребореального времени [Елина и др., 2005]. Новые данные, полученные в результате исследования, существенно дополняют знания о составе и особенностях отложений позднеледниковья, характере растительности, экологических условиях и динамике развития прогляциального приледникового водоема, непосредственно контактирующего с краем ледника. Они позволяют проследить эволюцию оз. Окуньозеро после его отделения от ОПО.

Основной целью представленной работы является восстановление истории формирования озерных отложений оз. Окуньозеро, динамики растительного покрова, гидрологических обстановок и климатических событий в Южной Карелии.

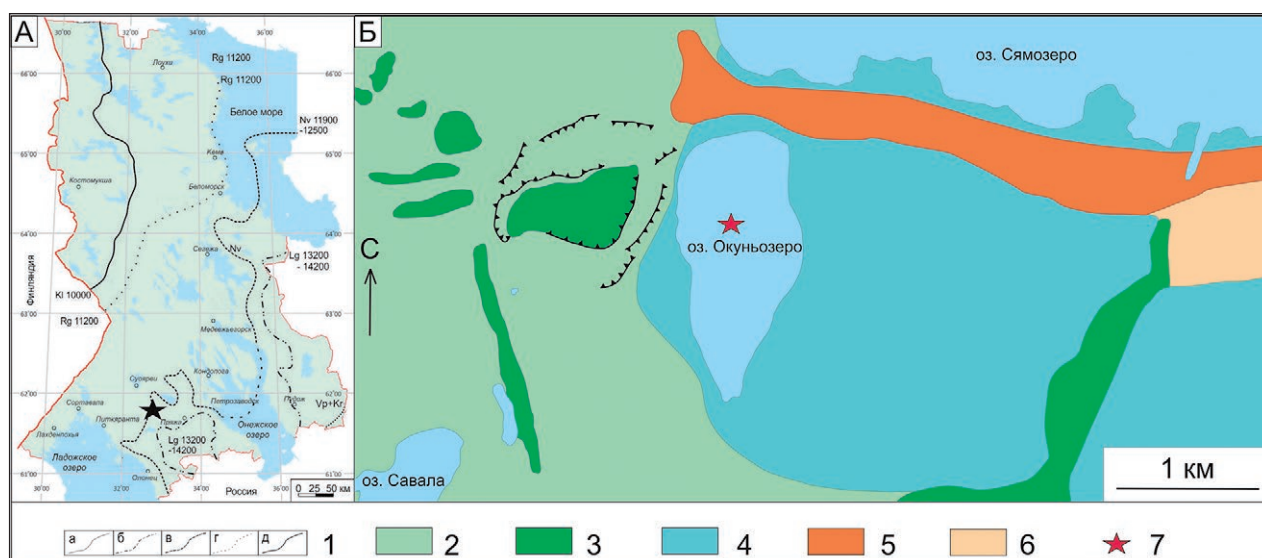


Рис. 1. Местоположение изученного разреза.

A: 1 – краевые образования [по: Ekman, Iljin, 1995]: а – вепсовско-крестецкой стадии; б – лужской стадии; в – невской (сямозерской) стадии; г – ругозерской стадии (сальпаусселькя I); д – калевальской стадии (сальпаусселькя II); Б: 2 – водно-ледниковые отложения «мертвого» льда; 3 – водно-ледниковые отложения оздов, камов, дельт; 4 – ледниково-озерные отложения; 5 – отложения краевых морен; 6 – моренные отложения; 7 – местоположение разреза

Fig. 1. Location of the studied sequence.

A: 1 – marginal deposits [after: Ekman & Iljin, 1995]: а – Vepsovian-Krestets; б – Luga; в – Neva (Syamozerian); г – Rugozerian (Salpausselkä I); д – Kalevala (Salpausselkä II); Б: 2 – glacio-fluvial deposits of 'dead' (stagnant) ice; 3 – glacio-fluvial deposits of eskers, kames, deltas; 4 – glacio-lacustrine deposits; 5 – end moraines deposits; 6 – moraine deposits; 7 – location of the studied sequence

Район исследований

Оз. Окуньозеро (61°50'40" с. ш. 33°08'27" в. д., абс. отм. 109,9 м) расположено в пределах юго-восточных границ Вешкельской ледораздельной возвышенности с дистальной стороны невских (сямозерских) краевых образований (рис. 1), датирующихся возрастом 12500–11800 (^{14}C) л. н. [Заключительный..., 1996; Ekman, Iljin, 1995]. Озеро имеет вытянутую в направлении с севера на юг форму. Максимальная длина 1,62 км, ширина 0,72 км, площадь около 0,82 км². Котловина озера, скорее всего, остаточного происхождения, ранее входила в состав ОПО.

С севера озеро окаймляют слабо выраженные в рельефе краевые гряды, относящиеся в настоящее время к невской (сямозерской) стадии деградации ледника. Климат территории умеренно-континентальный, средняя многолетняя температура: января –10 °С, июля +16 °С. Годовое количество осадков около 600 мм. Современная растительность представлена сосновыми, елово-сосновыми, еловыми кустарничково-зеленомошными лесами [Юрковская, 1993].

Материалы и методы

Весной 2018 года в середине озера со льда была пробурена скважина и получен керн донных осадков мощностью 530 см, послуживший материалом для данной работы. Глубина воды в месте отбора колонки 220 см. Снизу вверх вскрыты следующие осадки:

750–700 см – серо-голубые ленточноподобные алевриты с большим количеством растительных остатков. В тонких прослойках хорошо заметны черные примазки тонкопеллитового материала, иногда изменяющие цвет до коричневого;

700–650 см – серые гомогенные алевриты, переход в вышележащий слой резкий, отличается по цвету и составу отложений;

650–600 см – плотные коричневые сапропели с примесью алевритовой фракции. На гл. 635–630 см выделяется прослой серого алеврита. Сапропели с примесью алеврита постепенно переходят в плотные гомогенные сапропели;

600–220 см – сапропели гомогенные коричневые с неразложившимися растительными остатками, верхняя часть разреза с гл. 250–220 см разжижена (образцы не отобраны).

Образцы на микропалеонтологические анализы отобраны послойно, каждые 10 см. На радиоуглеродное датирование взят образец сапропеля с глубины 630–620 см. При обработке проб для спорово-пыльцевого анализа применяли общепринятый щелочной метод Поста [Пыльцевой..., 1950] и стандартный сепарационный метод Гричука [Гричук, Заклинская, 1948]. Флотация пыльцы производилась с помощью тяжелой калиево-кадмиевой жидкости (удельный вес 2,25). С использованием спорово-пыльцевого анализа изучено 50 образцов, которые просматривали под световым микроскопом Axiolab и определяли не менее 500 пыльцевых зерен. При идентификации пыльцы и спор привлекали справочники и атласы-определители [Куприянова, Алешина, 1972, 1978], собственную картотеку рисунков и описаний, а также базу <http://botany-collection.bio.msu.ru> [Информационная...]. В результате палинологического анализа определено 69 таксонов растений, в том числе 21 вид. Обработка данных и построение спорово-пыльцевой диаграммы выполнены с помощью программ TILIA и TGView [Grimm, 1990]. За 100 % принята сумма пыльцы деревьев, кустарников, кустарничков и трав. От нее рассчитывали процентное соотношение пыльцы этих групп растений и представленных в них таксонов. В группу кустарников отнесены *Alnus incana*, *A. glutinosa*, *Hippophae rhamnoides*, *Betula nana*, *Salix*, в группу кустарничков – *Ericales*, *Calluna vulgaris*. Содержание (в %) идентифицированных таксонов водных растений, спор и *Pediastrum* определяли относительно этой суммы. Параллельно с палинологическим исследованием в образцах проводили видовое определение водорослей *Pediastrum* [Komarek, Jankovska, 1999], подсчитывали количество устьиц хвойных деревьев (*Pinus*, *Picea*) и переотложенные дочетвертичные микрофоссилии, которые дают дополнительную информацию о фациальной обстановке и условиях осадконакопления. Количество устьиц хвойных, яиц тихоходок [Биологические...,

2013], а также микрочастиц угля приведены на диаграмме в абсолютном значении.

Техническая обработка проб и приготовление постоянных препаратов на диатомовый анализ выполнялись по общепринятой методике [Диатомовый..., 1949; Давыдова, 1985], при идентификации флоры использовалась различная справочная литература [Определитель..., 1951; Molder, Tynni, 1967–1973; Tynni, 1975–1980; Krammer, Lange-Bertalot, 1991; Лосева, 1992; Барина и др., 2006; Генкал, Трифонова, 2009; Генкал, Чекрыжева, 2011; Генкал и др., 2013, 2015; Куликовский и др., 2016].

Результаты

Радиоуглеродное датирование

Из сапропелей с гл. 630–620 см взят образец на радиоуглеродное датирование (^{14}C), которое проводилось в лаборатории Санкт-Петербургского университета. Полученная датировка приведена в табл. 1.

Спорово-пыльцевой анализ

По результатам анализа построена спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений оз. Окуньозеро (рис. 2), на которой выделено шесть пыльцевых зон (PZ), соответствующих модифицированной схеме Блитта – Сернандера [Хотинский, 1977].

PZ-1 (AL) *Betula* sect. *Albae* – *Pinus* – *Artemisia* – *Cyperaceae* – Pre-Quaternary (750–700 см) выделена в серо-голубых ленточноподобных алевролитах с большим количеством растительных остатков. Для спорово-пыльцевых спектров (СПС) данной PZ характерно значительное содержание пыльцы трав *Cyperaceae*, *Artemisia* и *Chenopodiaceae* (15–20, 20 и 10 % соответственно), которое к верхней границе снижается до 1–2 %. При этом доля пыльцы древесных, которая в основном колебалась в пределах 40–60 %, возрастает до 80 %, доминирует пыльца *Betula* sect. *Albae*

Таблица 1. Радиоуглеродный и калиброванный возраст органогенных отложений

Table 1. Radiocarbon and calibrated age of organogenic sediments

Лаб. номер Lab. no.	Глубина отбора, см Sampling depth, cm	Тип отложений для датирования Deposits type for dating	Радиоуглеродный возраст, лет назад Radiocarbon age, years ago	Калиброванный возраст, лет назад Calibrated age, years ago
ЛУ-9016	630–620	Сапропель с алевроитом Sapropel with aleurite	8760 ± 500	9940 ± 680

Примечание. Значения калиброванного возраста приведены на основании программы OxCal 4.2 (калибровочная кривая IntCal 13). Christopher Bronk Ramsey (<https://c14.arch.ox.ac.uk>).

Note. The calibrated ages are based on the OxCal 4.2 program (IntCal 13 calibration curve). Christopher Bronk Ramsey (<https://c14.arch.ox.ac.uk>).

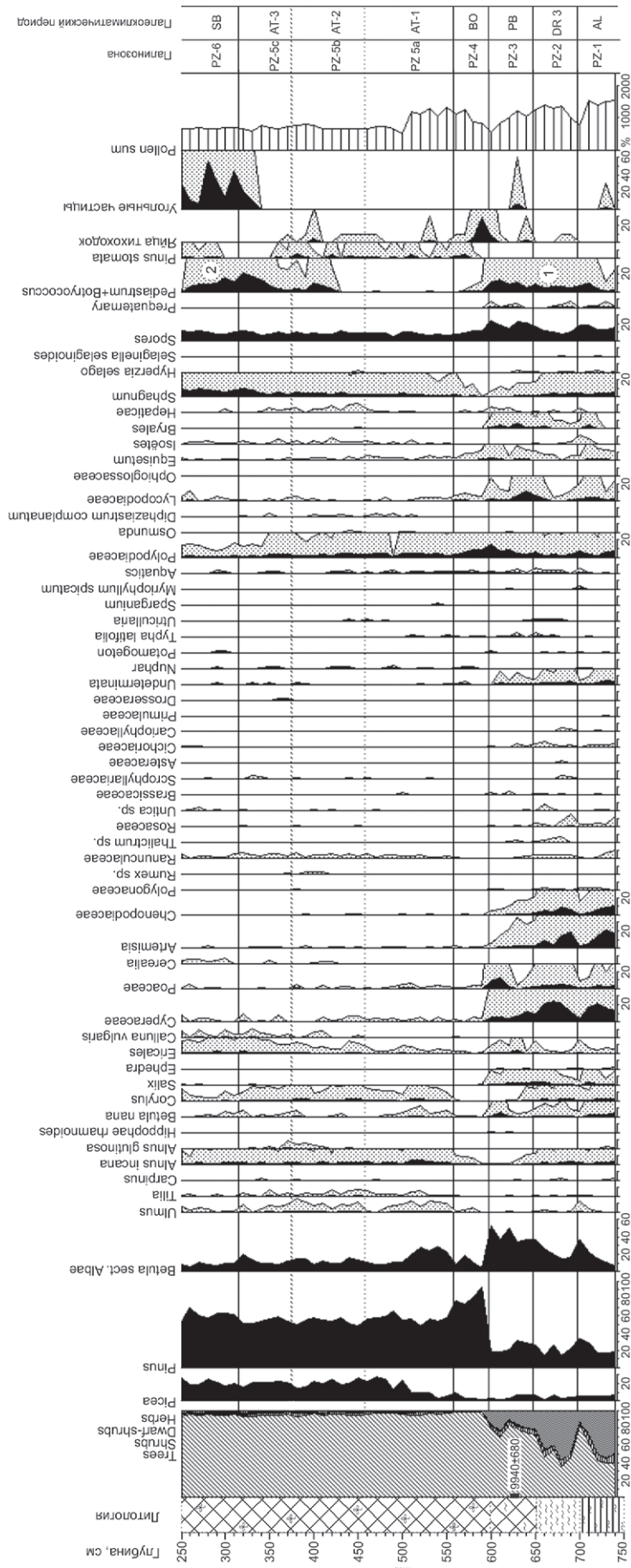


Рис. 2. Спорно-пыльцевая диаграмма донных отложений оз. Окуньюзеро (условные обозначения литологии – см. рис. 3)
Fig. 2. Spore-and-pollen diagram of bottom sediments from Lake Okunozero (see Fig. 3 for the legend)

(30 %) и *Pinus* (25–30 %). Вклад пыльцы кустарников невелик (5 %): *Betula nana* – 3–5 %, *Alnus incana* – 3 %, *Corylus* – 2 %. В нижней части PZ-1 отмечены единичные пыльцевые зерна *Ephedra*. Из разнотравья идентифицирована пыльца сем. Polygonaceae, Ranunculaceae и Rosaceae и др. В группе споровых доминируют Polypodiaceae, Lycopodiaceae, род *Sphagnum*, выявлены единичные споры *Hyperzia selago*, *Selaginella selaginoides* и Hepaticae. Наличие пыльцы термофильных растений (*Ulmus*, *Tilia*, *Carpinus*, *Corylus*), скорее всего, связано с переотложением. То, что оно имело место, подтверждает наличие значительного количества разрушенной, мелкой, деформированной пыльцы, а также дочетвертичных спороморф. Кроме того, отмечена низкая насыщенность осадков пылью, что свидетельствует о слабом развитии растительного покрова и его несомкнутости. Встречаемость угольных частиц, вероятнее всего, связана с пожарами. Полученные палинологические данные свидетельствуют о накоплении отложений в позднеледниковые (предположительно в конце аллереда).

PZ-2 (DR) Cyperaceae – Artemisia – Betula sect. Albae – Ephedra (700–650 см) выделена в серых гомогенных алевритах по уменьшению содержания пыльцы древесных и увеличению количества пыльцы трав. Для отложений PZ-2 характерно максимальное содержание пыльцы Cyperaceae (20 %), *Artemisia* (20 %) и Chenopodiaceae (10 %). Полученные значения для двух последних таксонов свидетельствуют об их обильности в экотопах [Hoek, 1997]. Отмечены единичные пыльцевые зерна *Ephedra*. В группе древесных преобладает пыльца *Pinus* (15–20 %) и *Betula* sect. *Albae* (15–35 %). Как и в предыдущей палинозоне, встречена пыльца переотложенных термофильных древесных растений. Отмечено небольшое количество пыльцы *Alnus incana*, *Salix*, *Betula nana* и *Ericales*, единичное – *Ephedra*. В отложениях по-прежнему велико количество разрушенной, мелкой пыльцы плохой сохранности, присутствуют дочетвертичные спороморфы, споры аркто-бореальных и гипоарктических видов *Hyperzia selago*, *Selaginella selaginoides*, а также печеночника Hepaticae, предпочитающего влажные местообитания с нарушенным почвенным покровом. Идентифицирована пыльца разнотравья (Brassicaceae, Cariophyllaceae, Cichoriaceae, Polygonaceae, Ranunculaceae, Rosaceae), а также пыльца водных растений (*Typha latifolia*, *Urticularia*). Водоросли широко представлены колониями *Pediastrum*, в основном *Pediastrum boryanum* var. *boryanum*, космополитом с широкой экологической амплитудой.

Учитывая максимум содержания пыльцы травянистых растений, главным образом *Artemisia*, Chenopodiaceae и Cyperaceae, на фоне уменьшения количества пыльцы древесных, можно предположить, что формирование отложений PZ-2 происходило в условиях холодного сухого позднего дриаса. Это согласуется с имеющимися данными для позднего дриаса [Лаврова, 2005].

PZ-3 (PB) Betula sect. Albae – B. nana – Poaceae – Polypodiaceae – Hippophae rhamnoides (650–600 см) выделена в сапропелях с примесью алеврита. Она отличается от предыдущей палинозоны увеличением количества пыльцы деревьев (с 45 до 85 %). Характерно максимальное для разреза содержание пыльцевых зерен *Betula* sect. *Albae*, которое на протяжении палинозоны увеличивается с 20 до 60 %, и присутствие пыльцы *B. nana* (3–5 %). При этом доля в СПС *Pinus* снизилась с 30 до 20 %, *Picea* – с 5 до 1 %. Встречены пыльцевые зерна *Hippophae rhamnoides*. В нижней части PZ-3 отмечено значительное количество микрофоссилий Cyperaceae (15–20 %) и Lycopodiaceae (до 10 %), в верхней – Poaceae (до 15 %), Polypodiaceae (до 15 %) и максимальное содержание колоний *Pediastrum* (до 15 %). Выше глубины 630–635 см, где слой сапропеля с примесью алеврита разделяет 5-см прослойка опесчаненного алеврита, резко возрастает количество пыльцы злаков и спор папоротников, а также уменьшается доля пыльцы осок и спор плаунов, что указывает на развитие сомкнутого растительного покрова и распространение лугоподобных ценозов. Накопление органо-генных осадков свидетельствует о снижении уровня воды и развитии самостоятельного водоема.

Согласно полученным данным, PZ-3 сформировалась в пребореале. На СПД (рис. 2) нижняя его граница проведена на уровне резкого подъема кривой пыльцы группы древесных, главным образом *Betula* sect. *Albae*, и снижения доли пыльцы трав *Artemisia*, Chenopodiaceae, Cyperaceae и Poaceae, верхняя – над пиком пыльцы *Betula* sect. *Albae*. О накоплении отложений в пребореальный период свидетельствуют также данные диатомового анализа и калиброванный возраст (9940 ± 680 кал. л. н.) отложений с глубины 630–620 см при условии их удревнения ($9940 + 680 = 10620$ кал. л. н.). Отметим, что некоторое омоложение радиоуглеродной датировки образца, включающего переходные осадки от алевритов к сапропелям, с невысоким содержанием органики, могло произойти из-за смешивания более древних и более молодых осадков в результате резкого падения уровня водоема.

PZ-4 (BO) *Pinus* – *Betula* sect. *Albae* (600–560 см) выделена в слое коричневых гомогенных сапропелей по максимальному для разреза содержанию пыльцы *Pinus* (80–90 %), резкому снижению доли *Betula* sect. *Albae* до 3 % в начале PZ и возрастанию до 20 % к верхней ее границе. Значительное увеличение в спектрах пыльцевых зерен *Pinus*, а также снижение *Betula* sect. *Albae* отражает возможный перерыв в осадконакоплении. При этом суммарное количество пыльцы деревьев увеличилось с 80 до 90 %, а трав (Cyperaceae и Poaceae) уменьшилось до 1–2 %. Характерно также появление в осадках устьиц хвойных пород деревьев, что указывает на произрастание их в радиусе 20 м от места сбора образцов [Pargshall, 2011]. Встречена в небольшом количестве пыльца *Alnus incana* (1–2 %), *Ulmus* (0,5 %). Почти полностью исчезают в спектре пыльцевые зерна *Artemisia* и Chenopodiaceae. Доминантами группы споровых являются Polypodiaceae: в начале палинозоны ее количество составляет 15 %, к концу падает до 2–3 %, количество спор Lycopodiaceae снижается до 1 %. Максимальное содержание пыльцы *Pinus* и отсутствие пыльцевых зерен перигляциальных растений позволяют предположить, что данные спектры сформировались в бореальное время. Обнаруженные в максимальном количестве яйца тихоходок (род *Macrobiotus*) свидетельствуют о существовании незагрязненных экотопов [Биологические..., 2013].

PZ-5 (AT) QM – *Picea* – *Pinus* (560–320 см) выделена в слое коричневых гомогенных сапропелей на гл. 400–300 см с неразложившимися растительными остатками. Характерна максимальная для разреза встречаемость пыльцевых зерен термофильных растений (*Ulmus*, *Tilia*, *Carpinus*, *Alnus glutinosa*, *Corylus*). Содержание в СПС *Picea* значительно увеличивается (с 10 до 25 %) на фоне доминирования *Pinus* (50–60 %) и снижения вклада *Betula* sect. *Albae* (до 10–20 %). Спорадически встречены пыльцевые зерна *Betula nana* (до 1 %). Постоянное присутствие в СПС *Ericales* свидетельствует о развитии кустарничкового яруса. Доля пыльцы трав (Ranunculaceae, Cyperaceae, Poaceae и др.) невелика (1–2 %). В группе споровых преобладают Polypodiaceae. К верхней границе палинозоны их количество уменьшается, а доля *Sphagnum*, напротив, увеличивается. Некоторые особенности спектров PZ-5 позволяют разделить ее на три субпалинозоны, относящиеся соответственно к началу (а), середине (b) и концу (с) атлантического периода.

PZ-5a (AT-1) *Picea* – *Pinus* – *Ulmus* – *Tilia* (560–460 см) характерно увеличение содер-

жания пыльцы термофильных растений (*Ulmus*, *Tilia* и *Corylus*). По сравнению с PZ-4 содержание в СПС *Pinus* несколько снижается (до 50–65 %), но продолжает оставаться наибольшим и далее по разрезу. В СПС вклад *Betula* sect. *Albae* сначала увеличивается до 30 %, а во второй половине PZ-5a уменьшается до 10 %. Рациональная граница пыльцы термофильных растений и *Alnus incana* регистрируется на контакте BO/AT-1.

PZ-5b (AT-2) QM – *Picea* – *Pinus* – *Alnus glutinosa* (460–380 см) выделена по максимальному присутствию *Ulmus* (1 %), *Tilia* (0,5 %), *Corylus* (1–2 %), а также появлению в спектрах *Alnus glutinosa*, более требовательной к теплу и почвам [Катунова и др., 2016]. Характерно по-прежнему высокое содержание пыльцы *Pinus* (50–55 %) и *Picea* (15–25 %). Спорадически отмечена пыльца *Calluna vulgaris*. Впервые появляется пыльца культурных злаков и ее спутник *Rumex* sp. В спектрах регистрируются зеленые водоросли *Botryococcus* (1–10 %), представляющие интерес для восстановления условий осадконакопления в водоеме.

PZ-5c (AT-3) *Picea* – *Pinus* – *Betula* sect. *Albae* (380–320 см) характеризуется постепенным снижением пыльцы *Ulmus*, *Corylus* и более существенным уменьшением *Tilia*, *Alnus glutinosa* к верхней границе **PZ-5c**. Встречены единичные пыльцевые зерна *Carpinus*, которые, скорее всего, принесены из более южных районов. В СПС по-прежнему преобладают *Pinus* (до 55 %) и *Picea* (20 %), *Betula* sect. *Albae* составляет 10–15 %. Присутствие пыльцевых зерен *Betula nana*, спор *Sphagnum* и находка пыльцы Drosseraceae свидетельствуют о дальнейших процессах заболачивания территории. Отмечено увеличение пыльцы *Ericales* (с 1 до 2 %), что свидетельствует о расселении верескоцветных. Количество водорослей *Botryococcus* возрастает по сравнению с предыдущей PZ до 20 %. Весь изложенный материал подтверждает формирование PZ-5 в атлантическое время. Верхняя граница атлантического периода проводится на уровне падения кривой пыльцы QM.

PZ-6 (SB) *Pinus* – *Picea* – *Cerealia* type – *Sphagnum* (320–250 см) выделена в гомогенных коричневых сапропелях. Отличается увеличением содержания пыльцы *Picea* (20–25 %) на фоне доминирования *Pinus* (60–70 %) и снижения *Betula* sect. *Albae* (до 10 %). Пыльца *Alnus incana* внесла существенный вклад (2–3 %) в формирование спектров, *Alnus glutinosa* в отложениях PZ отсутствует. Пыльцевые зерна термофильных растений (*Ulmus*, *Tilia*, *Corylus*) встречаются в незначительном количестве.

В СПС отмечено максимальное содержание *Ericales* (2–2,5 %).

Идентифицированы пыльцевые зерна *Se-realia* (1 %), а также отмечено большое количество угольных частиц, вероятнее всего, связанное с человеческой деятельностью, а именно с земледелием. В группе споровых преобладают сфагновые мхи. По данным анализа, спектры PZ-6 сформировались в суббореальное время. К сожалению, верхнюю часть разреза, представленную разжиженными сапропелями (250–220 см), отобрать и изучить не удалось. По-видимому, они накапливались в конце суббореала и в субатлантическое время.

Диатомовый анализ

Методом диатомового анализа исследовано 50 образцов послойно, каждые 10 см. В донных отложениях выявлено 186 видов и разновидностей диатомовой флоры из 42 родов. В результате исследования по составу полученных комплексов выделено 8 диатомовых зон (DZ), соответствующих различным этапам развития водоема и палеоклиматическим периодам позднеледниковья и голоцена. Результаты исследований представлены на диаграмме (рис. 3).

DZ-1 (750–700 см) выделена в серо-голубых ленточноподобных алевролитах с большим

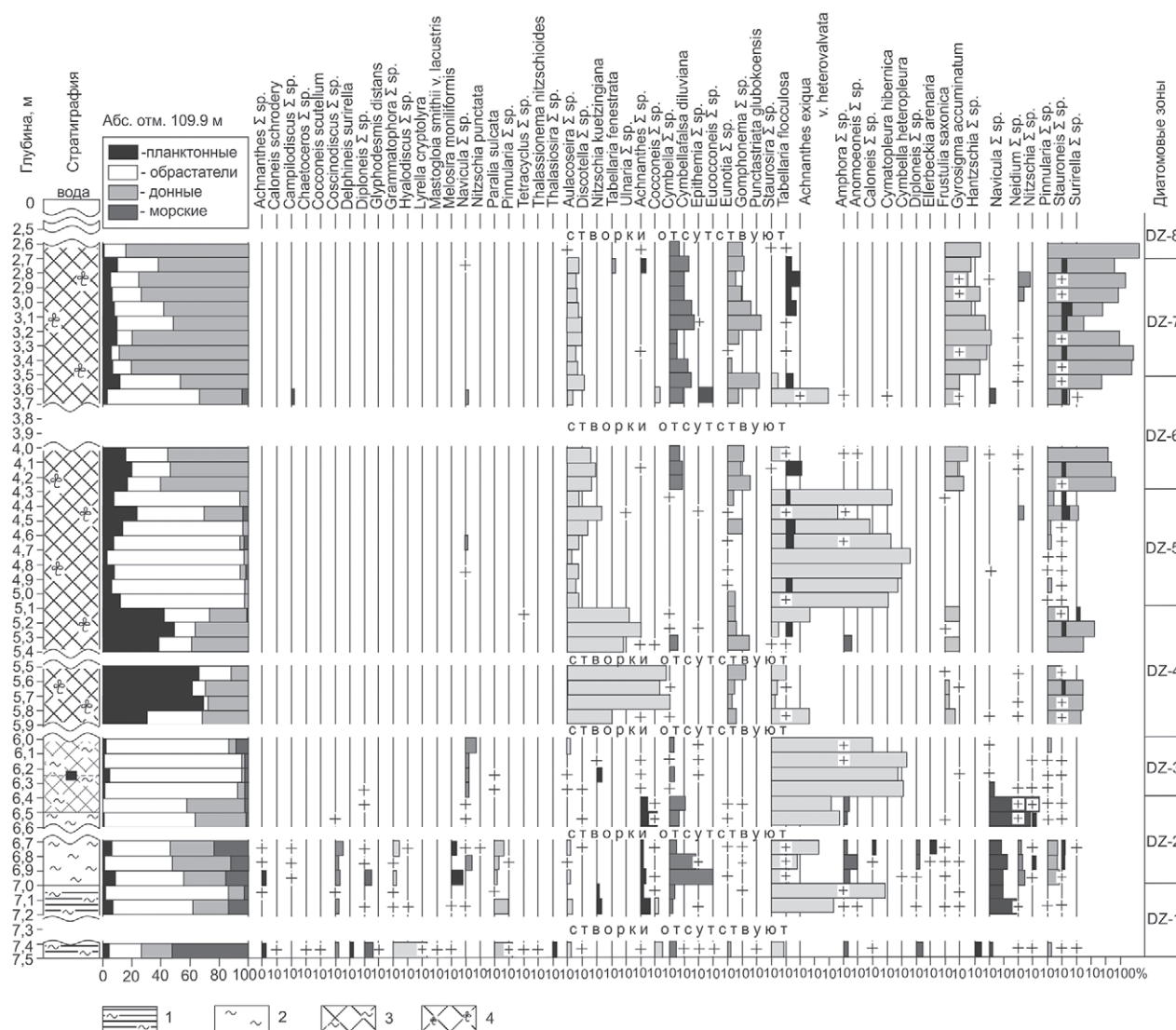


Рис. 3. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Окуньозеро:

1 – ленточноподобные алевролиты, 2 – серые гомогенные алевролиты, 3 – сапропель с алевролитом, 4 – сапропели с растительными остатками, 5 – разжиженные сапропели

Fig. 3. Diatom diagram of bottom sediments from Lake Okunozero:

1 – ribbon-like aleurites, 2 – gray homogeneous aleurites, 3 – sapropel with aleurite, 4 – sapropels with plant remains, 5 – liquefied sapropels

количеством растительных остатков. На протяжении данного слоя створки диатомовых обнаружены лишь в трех образцах, на гл. 740–720 см створки в осадках отсутствуют. В начале зоны абсолютное господство принадлежит переотложенным морским солоноватоводным формам: *Paralia sulcata*, *Grammatophora* sp., *Diploneis* sp., *Coscinodiscus* sp., *Hyalodiscus* sp., *Melosira moniliformis*, *Gyrosigma acuminatum*, *Cocconeis* sp., *Nitzschia* sp. и др. (табл. 2). Однако в составе комплекса присутствуют пресноводные виды родов *Aulacoseira* sp., *Achnanthes* sp., *Cymbella* sp., *Staurosira* sp., *Ellerbeckia arenaria*. Причем содержание пионерных видов *Staurosira* sp. в конце этапа достигает более 70 %, что может указывать на их развитие в мелководной зоне. Все это вместе с литологией осадков позволяет говорить о переотложении материала, возможно, микулинского возраста. Черные примазки, придающие полосчатость ленточновидным алевритам, явное тому подтверждение. Основываясь на полученных данных, можно предположить, что оз. Окуньозеро входило в состав Онежского приледникового водоема, когда 11800 л. н., в невскую (сямозерскую) стадию деградации ледника, его край находился севернее нынешнего озера Сямозеро, а вся освободившаяся часть бассейна покрывалась плавучими айсбергами [Демидов, 2004, 2005]. Около 11300–11200 л. н. его уровень достигал отметок 120 м [Субетто и др., 2019]. В аллереде, по многочисленным данным, на дне Онежского озера отлагались ленточные глины, а в более мелководной зоне, где и расположено оз. Окуньозеро, – ленточноподобные алевриты [Шелехова и др., 2004, 2005; Демидов, 2006]. Следовательно, можно предположить, что отложения данной DZ сформировались в это время.

DZ-2 (700–640 см). Время накопления серых гомогенных алевритов с резким переходом в плотные коричневые сапропели с примесью алеврита. На данном этапе в осадках все еще присутствуют переотложенные морские формы, выявленные в DZ-1. Однако доля некоторых из них (*Paralia sulcata*, *Grammatophora* sp.) существенно снижается (с 22 до 2 %), а роль пресноводного комплекса, напротив, увеличивается. Повышается численность видов обрастаний из родов *Staurosira* sp. (с 5 до 40 %), *Cymbella* sp., *Achnanthes* sp., донных родов *Navicula* sp., *Pinnularia* sp., *Amphora* sp., *Neidium* sp. Кроме снижения к концу этапа численности переотложенных морских форм важно отметить также полное отсутствие створок на гл. 670–660 см. Данный факт может свидетельствовать о замедлении процессов переот-

ложения и прекращении к концу этапа выноса переотложенного материала. В осадках с гл. 660 см фиксируется достаточно резкое уменьшение участия планктонного сообщества и видов обрастаний, указывая на снижение уровня водоема, вероятно, в результате его отделения от крупного приледникового бассейна и похолодания климата в позднем дриасе.

DZ-3 (640–600 см) выделена на основании резкого изменения литологии осадков (гомогенные алевриты сменяются алевритистыми сапропелями) и доминирования в диатомовом комплексе форм обрастаний рода *Staurosira* sp., составляющих 80–90 % всей флоры. При этом снизилось до минимума 2–10 % количество донных форм, представленных в основном родом *Navicula* sp. Примерно в таком же количестве (до 2 %) присутствуют в составе комплекса и формы обрастаний *Cymbella* sp.

Несмотря на то что радиоуглеродная датировка (табл. 1) с гл. 620–630 см свидетельствует о накоплении осадков в бореальное время (8760 ± 500), мы считаем, что их седиментация происходила в пребореале ($8760 + 500 = 9260$). Это подтверждается и данными микропалеонтологических анализов.

В DZ-4 (590–510 см) значительная перестройка структуры диатомового комплекса, подтверждающая снижение уровня водоема, продолжается. На данном этапе в сапропелях с растительными остатками начинают развиваться планктонные формы из рода *Aulacoseira*, характерные для небольших неглубоких северных водоемов, такие как *Aulacoseira italica* var. *valida*, *A. distans*, *A. ambigua*, в сумме составляющие от 30 до 70 %. Кроме этого, в составе комплекса с 2 до 12 % возрастает доля типично болотных форм рода *Eunotia* sp., лишь в виде единичных экземпляров фиксируемых на предыдущих этапах. В качестве доминантов выступают также донные формы рода *Pinnularia* sp. Заметно участие *Frustulia saxonica*. Все эти формы являются обитателями мелководий северных слабоминерализованных водоемов с кислыми условиями среды. Их наличие служит наглядным показателем заболачивания прилегающих к озеру осушенных акваторий.

DZ-5 (510–430 см), на протяжении которой продолжали накапливаться сапропели с растительными остатками, отличается значительным снижением доли планктонного сообщества рода *Aulacoseira* с 50 до 2–25 % и возрастанием ранее развивавшихся форм обрастаний рода *Staurosira* sp. (40–85 %). Одновременно в составе комплекса отмечено меньшее участие видов *Eunotia* sp. и *Pinnularia* sp., что может свидетельствовать о снижении процессов за-

Таблица 2. Список переотложенных морских видов в донных осадках оз. Окуньозеро

Table 2. List of redeposited marine species in the bottom sediments of Lake Okunozero

№ No.	Названия видов Species	Экология Environment
1	<i>Achnanthes brevipes</i> C. Agardh	Солоноватоводно-морской вид, мезогалоб, космополит, литораль морей, солоноватоводные континентальные водоемы Brackish-water-marine species, mesohalob, cosmopolitan, littoral of seas, brackish continental water bodies
2	<i>A. longiceps</i> Ag.	Морской, в литорали морей, межледниковье Marine, in the littoral of seas, interglacial period
3	<i>Caloneis schrödery</i> Hust.	Опресненные воды Desalinated water
4	<i>Campilodiscus echeneis</i> Ehren.	Солоноватоводный, в послеледниковых отложениях Brackish-water, in postglacial sediments
5	<i>C. hibernicus</i> Ehren.	Солоноватоводный, в межледниковых отложениях Brackish-water, in interglacial sediments
6	<i>Campilodiscus</i> sp. Ehren.	Морские и солоноватоводные, прибрежные участки морей Marine and brackish-water, coastal areas of seas
7	<i>Chaetoceros</i> sp. Ehren.	Морские, планктонные Marine, planktonic
8	<i>Cocconeis scutellum</i> var. <i>parva</i>	Литораль морей, эугалоб Littoral of seas, eugalob
9	<i>Coscinodiscus</i> sp.	Морской, пелагический Marine, pelagic
10	<i>Delphineis surirella</i> (Ehrenberg) G. W. Andrews	Солоноватоводно-морской, литоральный, северные моря, полигалоб Brackish-water-marine, littoral, northern seas, polyhalob
11	<i>Diploneis interrupta</i> (Kützing) Cleve	В солоноватых водоемах, у берегов северных морей, ископаемые – межледниковье In brackish water bodies, the coast of the northern seas, fossils – interglacial period
12	<i>D. smithii</i> (Breb.) Cl.	Солоноватые водоемы и эстуарии рек, литораль морей, межледниковье Brackish water bodies and estuaries of rivers, littoral of seas, interglacial period
13	<i>D. smithii</i> var. <i>maior</i> (Breb.) Cl.	Солоноватые водоемы и эстуарии рек, литораль морей, межледниковье Brackish water bodies and estuaries of rivers, littoral of seas, interglacial period
14	<i>Diploneis</i> sp.	Солоноватые водоемы и эстуарии рек, литораль морей, межледниковье Brackish water bodies and estuaries of rivers, littoral of seas, interglacial period
15	<i>D. subcincta</i> (A. Schmidt) Cleve	Морской бентос, полигалоб Marine benthos, polyhalob
16	<i>Glyphodesmis distans</i> (Greg.) Grun.	Литораль морей Littoral of seas
17	<i>Grammatophora angulosa</i> var. <i>islandica</i> (Ehren.) Grun.	Морская сублитораль Marine sublittoral
18	<i>Grammatophora</i> sp.	Морская сублитораль Marine sublittoral
19	<i>Hyalodiscus scoticus</i> (Kutz.) Grun.	Литораль морей и солоноватые воды (литорина Балтики, межледниковье) Littoral of seas and brackish waters (littoral of the Baltic, interglacial period)
20	<i>Hyalodiscus</i> sp.	Литораль морей и солоноватые воды (литорина Балтики, межледниковье) Littoral of seas and brackish waters (littoral of the Baltic, interglacial period)
21	<i>Lyrella cryptolyra</i> (Brockmann) Stickle et D. G. Mann	Морской бентос, полигалоб Marine benthos, polyhalob
22	<i>Mastogloia smithii</i> var. <i>lacustris</i> (Grun.)	Солоноватоводно-пресноводный Brackish-freshwater

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№ No.	Названия видов Species	Экология Environment
23	<i>Navicula digitoradiata</i> (W. Gregory) Ralfs	Солоноватоводно-морской, в северных морях Brackish-water-marine, in the northern seas
24	<i>N. peregrina</i> (Ehren.) Kützing	Солоноватоводный, в континентальных водоемах и морях Brackish-water, in continental waters and seas
25	<i>Navicula</i> sp.	Морской Marine
26	<i>Nitzschia punctata</i> (W. Sm.) Grun.	Солоноватоводный, в прибрежной части морей, устья рек, межледниковье Brackish-water, in the coastal part of seas, river estuaries, interglacial period
27	<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve	Прибрежный планктон и бентос морей Coastal plankton and benthos of seas
28	<i>Pinnularia globiceps</i> W. Gregory	Морской (слабосоленые воды) Marine (slightly salted waters)
29	<i>P. quadratarea</i> var. <i>subproducta</i> (Grunow) Cleve	Морской бентос, полигалоб Marine benthos, polyhalob
30	<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky	Морской планктон, полигалоб Marine plankton, polyhalob
31	<i>Thalassiosira</i> sp.	Солоноватоводный, планктонный. Неритический, в опресненных участках морей, бореальный Brackish-water, planktonic. Neritic, in desalinated areas of seas, boreal

болачивания. Массовое развитие видов *Staurosira* sp. указывает на лучшее прогревание водоема, возможное лишь в теплых условиях атлантического времени.

DZ-6 (430–350 см) – дальнейшее накопление таких же сапропелей. На гл. 400–370 см створки диатомовых отсутствуют. Однако в данной DZ вновь отмечается вспышка в развитии типично болотных форм из родов *Eunotia* sp., *Pinnularia* sp., *Frustulia saxonica*, благодаря чему можно предположить дальнейшее заболачивание акватории водоема, повышение увлажненности климата. Кроме того, обращает на себя внимание заметное увеличение доли обрастателей из родов *Cymbella* sp., *Epithemia* sp. (до 10 %), появление единичных *Campilodiscus* sp., *Surirella* sp. Все эти изменения могли быть связаны с усилением поступления в водоем питательных веществ, необходимых для развития диатомовых водорослей за счет поверхностного стока, в результате потепления и увеличения влажности климата в атлантическое время.

DZ-7 (350–270 см) – продолжали накапливаться сапропели с растительными остатками. На гл. 350–320 см при достаточно стабильном содержании (до 10 %) прежних планктонных форм *Aulacoseira* sp. практически полностью исчезли виды *Staurosira* sp. В два раза возрастает роль донных *Pinnularia* sp., *Frustulia saxo-*

nica, а доля форм обрастаний родов *Cymbella* sp., *Eunotia* sp. снижается. Появляются створки видов родов *Epithemia* sp., *Neidium* sp. На втором этапе данной зоны (320–270 см) доля донных форм вновь увеличивается. Среди них повышается содержание *Pinnularia* sp. В большем количестве отмечены формы обрастаний *Tabellaria flocculosa*. Появляются единичные *Gyrosigma accuminatum*, *Stauroneis* sp., *Neidium* sp. (8 %). Господство донных форм – явный показатель небольшой глубины озера, уровень которого, вероятно, вновь снизился, что могло произойти в результате некоторой сухости и похолодания климата в суббореальное время. Это подтверждается и появлением новых галофильных видов *Epithemia* sp., развитие которых часто связано с усилением процессов подземного питания, характерных для данного времени.

DZ-8 (270–250 см) – в сапропелях с растительными остатками отмечается минимальное присутствие планктонных форм. Более 80 % составляют прежние донные *Pinnularia* sp., *Frustulia saxonica*. Отмечены единичные створки видов из обрастаний *Achnanthes* sp. Все факты свидетельствуют о дальнейшем снижении уровня водоема и повышении кислотности водной среды, т. к. вышеназванные виды предпочитают pH не более 5,5. Выше по разрезу на гл. 250–220 см сапропели не содержат

створок диатомовых водорослей, отсутствие которых можно объяснить рядом факторов: нехваткой кислорода, кремнекислоты, условиями среды и т. д. Предположительно, такие условия сложились на данной территории в субатлантическом периоде.

Обсуждение результатов

В невскую (сямозерскую) стадию деградации ледника его край находился севернее нынешнего озера Сямозеро, а освободившаяся часть бассейна Онего покрывалась плавучими айсбергами [Демидов, 2006]. **В аллереде (13 600–12 900 кал. л. н.)** край ледника в северной части нынешнего Сямозера непосредственно контактировал с ОПО, достигавшим максимальных размеров и включавшим Шуйскую низменность до современных отметок 120–130 м [Субетто и др., 2019]. В это время на дне ОПО отлагались ленточные глины [Шелехова и др., 2004, 2005], а в более мелководной зоне – ленточноподобные алевриты [Демидов, 2006]. Результаты анализа данных, полученных при исследовании отложений оз. Окуньозеро, свидетельствуют о том, что в аллереде (13 000 кал. л. н.) оно являлось заливом ОПО, в котором накапливались серо-голубые ленточноподобные алевриты с большим количеством растительных остатков. Аллеред – фаза позднеледникового глобального потепления и увлажнения климата, во время которого создались условия для жизни растений различных экологических группировок. На территории исследования в это время распространялись перигляциально-степные сообщества с участием *Ephedra*, *Chenopodiaceae*, *Artemisia* и тундровые ерниковые кустарничково-зеленомошные ценозы. Роль карликовой березы в ценозах велика, так как представленность ее в СПС в 10 раз меньше, чем в растительном покрове [Шешина, 1980]. Присутствие *Hepaticae* свидетельствует о сырых равнинных тундровых экотопах и незакрепленных или нарушенных грунтах. В условиях относительно теплого интерстадиала аллеред, когда происходило интенсивное таяние ледника, большое количество материала привносилось в приледниковый водоем вместе с тальми водами. Пыльца деревьев занесена ветром или переотложена, так же как и обнаруженные в алевритах угольные частицы. В конце аллереда на территории исследования были распространены ерnikово-зеленомошные тундровые, поlynно-маревые сообщества и разнообразные травяные, а в наиболее благоприятных защищенных от ветра местообитаниях – редкостойные бе-

резовые сообщества с примесью ольхи серой и небольшим участием сосны.

Результаты диатомового анализа также указывают на значительное переотложение материала, возможно микулинского возраста, что подтверждается достаточно высоким содержанием морских диатомей (табл. 2). В большинстве изученных водоемов [Шелехова и др., 2004, 2005] в это время отмечаются лишь единичные переотложенные створки морских видов и присутствие, в том числе в оз. Окуньозеро, характерного для позднеледникового вида *Ellerbeckia arenaria*. Результаты изучения донных отложений исследованного водоема согласуются с имеющимися данными и дополняют знания о природных условиях этого времени. До конца аллереда Онежский приледниковый водоем на западных побережьях оставался прогляциальным и непосредственно контактировал с ледником Вешкельской возвышенности (около озера Сямозеро), на что указывает переотложенная флора. В конце аллереда произошла первая регрессия ОПО [Демидов, 2005; Онежское..., 2010; Субетто и др., 2019].

Поздний дриас (12 900–11 700 кал. л. н.). В позднем дриасе оз. Окуньозеро еще оставалось в составе ОПО. Однако, по нашим данным, его уровень в это время резко падает, идет накопление серых гомогенных алевритов. В конце периода прекращаются процессы переотложения материала. На исследованной территории сохраняются тундровые ерниково-зеленомошные ценозы, в связи с похолоданием и сухостью климата широко распространяются несомкнутые поlynно-маревые группировки как более адаптивные к этим условиям. Участие лесотундровых сообществ в растительном покрове сокращается. Присутствие *Ephedra*, светолюбивого ксерофита, обычного растения степей и полупустынь, характеризует сухие местообитания и бедные органикой каменистые почвы. Резкое снижение уровня водоема зафиксировано в составе диатомового комплекса с господством литоральных и донных видов, отвечающего условиям похолодания и ксерофитизации климата. Падение его обусловлено очередной регрессией ОПО (12 300 тыс. кал. л. н.) после возобновления стока через долину р. Свирь в Ладожское озеро [Демидов, 2006; Онежское..., 2010; Субетто и др., 2019]. Возможно, в это время заканчивается таяние мертвого льда Вешкельской ледораздельной возвышенности.

Пребореальный период (11 700–10 500 кал. л. н.). Гомогенные алевриты сменяются алевритистыми сапропелями. Состав диатомового комплекса с господством видов рода *Stau-*

rosira sp. свидетельствует об отделении его от крупного приледникового бассейна и дальнейшем самостоятельном развитии. Потепление и увеличение влажности климата способствует распространению лесной растительности и вытеснению, таким образом, тундровых сообществ. Свободные от льда и воды участки суши заселяются березой, являющейся пионерной породой. Присутствие псаммофита *Hippophae rhamnoides* характеризует ценозы на каменистых, щебнистых грунтах и субстраты с несформированным почвенным покровом, а *Hyperzia selago*, *Hepaticae* свидетельствуют о сырых равнинных тундровых экотопах и незакрепленных или нарушенных грунтах. Во второй половине пребореала уменьшается участие плаунов и увеличивается роль папоротникообразных в травяном ярусе, что свидетельствует о распространении сомкнутого растительного покрова. В связи с нарастающей тепло- и влагообеспеченностью в пребореальном периоде широкое развитие на исследованной территории получили березовые леса с примесью сосны и лугоподобные крупнотравные сообщества со злаками.

Бореальный период (10300–8800 кал. л. н.). Сухой прохладный климат бореального времени, а также песчаные грунты дают толчок к массовому развитию светлехвойных сосновых с примесью березы лесов. Полученные результаты показывают, что на рубеже пребореал-бореального времени произошел перерыв в осадконакоплении, о чем свидетельствует резкое увеличение в спектрах пыльцы сосны и снижение доли пыльцы берез, что характерно для второй половины бореала [Хотинский, 1977]. Встречающаяся в спектрах пыльца *Ulmus* и *Corylus* может указывать на их присутствие в благоприятных условиях, но, скорее всего, она является заносной из более южных районов. Отсутствие пыльцы полыней и маревых свидетельствует о деградации перигляциальной растительности. Значительное снижение количества спор плаунов характеризует развитие сомкнутого растительного покрова. К концу бореального периода леса приобретают среднетаежный облик. Диатомовый комплекс бореала отражает более сухие климатические условия, начало заболачивания окружающего водосбора, дальнейшее изменение уровня озера. Снижения уровней водоемов, причем часто довольно значительные, характерны для бореального времени всех изученных озер Карелии и связаны с сухостью климата этого времени, гляциоизостатическим поднятием территории, неотектоническими процессами [Шелехова, Лаврова, 2020].

Атлантический период (8800–5300 кал. л. н.). В начале теплого влажного атлантического времени получили распространение среднетаежные сосново-еловые леса с примесью широколиственных пород (*Ulmus*, *Tilia*). Необходимо отметить, что количество ели в древостое обычно в 2–4 раза больше, чем отмечается в спектрах [Елина, 1981]. Следовательно, можно предполагать, что в растительном покрове преобладающими были монодоминантные еловые леса. Затем они сменились на южнотаежные еловые, а также сосново-еловые и березово-сосновые с верескоцветными в наземном покрове. В кустарниковом ярусе кроме ольхи серой и лещины появляется более требовательная к почвам и теплу ольха черная. Отмеченные единичные зерна культурных злаков, скорее всего, имеют заносный характер. Поэтому связывать их наличие с началом земледелия невозможно. Встречаемость *Betula nana* наряду с увеличением доли *Sphagnum* свидетельствует о процессах заболачивания территории вокруг водоема после снижения его уровня. Большое количество широко распространенных зеленых водорослей *Botriococcus*, предпочитающих пресноводные мелкие, в том числе временные, слегка заболоченные водоемы [Van Geel, 2001], характеризуют неглубокий, хорошо прогреваемый водоем. В теплое атлантическое время возрастает видовое разнообразие диатомового комплекса, увлажнение выражается в увеличении содержания типично болотных форм.

Суббореальный период (5300–2600 кал. л. н.). Климат суббореала был холоднее и суше, чем в атлантическом периоде, но гораздо теплее, чем в настоящее время. Резкое похолодание и уменьшение влажности климата привело к сокращению участия термофильных растений *Ulmus*, *Tilia*, *Alnus glutinosa*, *Corylus*. Для отложений этого времени характерен первый верхний максимум пыльцы ели [Хотинский, 1977], который не отмечается в спектре данного разреза. Напротив, количество пыльцы ели (18–20 %) неизменно начиная со второй трети атлантического периода. Значительное участие в составе спектров атлантикума пыльцы ели (23 %) отмечено и в разрезе Льежесуо [Елина, 1981], расположенном в 12 км от района исследований, что, несомненно, отражает локальные благоприятные для нее эдафические условия. Возможно, на расселение ели в данном районе оказали влияние четвертичные отложения, представленные супесчано-суглинистыми моренами краевых гряд сямозерской стадии деградации ледника и сформированные на них почвы. На увлажненных понижениях доминиру-

ющими становятся еловые и сосново-еловые леса. Сосновые леса с березой и ольхой серой произрастали на прилегающей к озеру флювиогляциальной дельте, сложенной песками, и на склонах камовых холмов. Пыльца культурных злаков и огромное количество частиц угля, по-видимому, свидетельствуют о начале земледелия. Диатомовый комплекс обновляется некоторыми видами, требующими повышения минерализации воды, например *Epithemia* sp., *Neidium* sp., *Gyrosigma accuminatum*, *Stauroneis* sp., что, вероятно, обусловлено усилением подземного питания, характерного для данного времени.

Следует обратить внимание на отсутствие диатомовой флоры в нескольких горизонтах, практически в каждом палеоклиматическом периоде на гл. 740–720, 670–660, 550–540, 400–370, 260–220 см (рис. 3). Отсутствие створок диатомовых водорослей в отложениях позднеледниковья, представленных ленточноподобными алевритами, в водоемах Карелии наблюдается довольно часто и связано с пульсирующим характером поступающих в водоем талых холодных и мутных вод, в которых не создается условий для развития флоры. Такое фиксировалось в ранее изученных разрезах (Пертозеро, Шавнилампи, Лайнозеро, Сяргозеро, Полевское) [Шелехова и др., 2004, 2005; Shelekhova et al., 2016; Шелехова, Лаврова, 2019]. А вот отсутствие диатомовой флоры в голоценовых осадках, представленных сапропелями, объяснить труднее. Можно высказать лишь предположение, что как в сухие периоды бореального и суббореального времени, так и на отдельных этапах влажных атлантического и субатлантического периодов из-за мелководности водоема и заболачивания окружающих территорий цветность воды возрастала, а прозрачность – заметно снижалась. Свет, необходимый для фотосинтеза, является одним из главных факторов, влияющих на развитие диатомей. После отделения Окуньозера от ОПО на протяжении всего голоцена это был мелководный водоем, глубиной 3–5 м. Более того, примыкающая к озеру с востока ледниково-озерная равнина постепенно заболачивалась на протяжении голоцена.

Заключение

Результаты анализа данных, полученных при исследовании отложений, свидетельствуют о том, что в конце аллерада оз. Окуньозеро являлось довольно глубоководным заливом прогляциального ОПО. Отложения аллерада характеризуются значительным количеством

переотложенных морских форм диатомовых водорослей. В них впервые выявлено более 30 видов и разновидностей переотложенной морской флоры, чего не наблюдалось в ранее изученных разрезах этого времени. СПС также включают переотложенные и дальнезаносные пыльцевые зерна, пыльцу и споры растений из окружающих местообитаний. Растительный покров позднеледниковья не имел аналогов в современности. Он был несомкнутым, с мозаичной структурой, включал виды, разнообразные как по экологии, так и по географическому происхождению. Полученные данные подтверждают распространение перигляциально-степных и тундровых ценозов, а в благоприятных местообитаниях, возможно, и березовых и ольховых лесотундровых сообществ. Изменения климата в позднеледниковье приводили к перераспределению площадей, занимаемых вышеназванными сообществами, причем их состав оставался прежним.

Отделение озера от приледникового водоема произошло в конце позднего дриаса. В это время накапливались гомогенные алевриты, практически прекратились процессы переотложения. В позднем дриасе широкое распространение имели тундровые ерниково-зеленомошные и несомкнутые поlynно-маревые группировки, сменившиеся в пребореале на березовые леса с примесью сосны и лугоподобные крупнотравные сообщества. Уровень водоема постоянно снижался, он оставался слабоминерализованным с кислыми условиями среды. В пребореальное время водоем развивался самостоятельно. В бореальное время получили распространение средне-таежные светлохвойные сосновые с примесью березы леса. В атлантический оптимум они сменились южнотаежными еловыми, с широколиственными породами, сосново-еловыми и березово-сосновыми лесами. С суббореала на территории исследования преобладающими становятся еловые и елово-сосновые леса. Указаны возможные причины отсутствия диатомовых водорослей в отдельных горизонтах почти в каждом палеоклиматическом периоде: это мутность талых холодных вод, цветность, недостаток света, кислорода и кремнекислоты.

Авторы выражают благодарность Г. Н. Родионову за подготовку графических материалов.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН, АААА-А18-118020690231-1).

Литература

- Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с.
- Биологические индикаторы в палеоэкологических исследованиях: Атлас / Отв. ред. Л. Б. Назарова. Казань: Казанский ун-т, 2013. 147 с.
- Бискэ Г. С., Лак Г. Ц., Лукашов А. Д., Горюнова Н. Н., Ильин В. А. Строение и история котловины Онежского озера // Труды Ин-та геологии КФ АН СССР. 1971. Вып. 7. 74 с.
- Генкал С. И., Куликовский М. С., Михеева Т. М., Кузнецова И. В., Лукьянова Е. В. Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. М.: Научный мир, 2013. 236 с.
- Генкал С. И., Трифонова И. С. Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2009. 72 с.
- Генкал С. И., Чекрыжева Т. А. Центрические диатомовые водоросли (Bacillariophyta, Centrophyceae) водоемов Карелии // Биол. внутр. вод. 2011. № 1. С. 5–16.
- Генкал С. И., Чекрыжева Т. А., Комулайнен С. Ф. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии / Отв. ред. В. Г. Девяткин. М.: Научный мир, 2015. 202 с.
- Гричук В. П., Заклинская Е. Д. Анализ ископаемой пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географгиз, 1948. 223 с.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Демидов И. Н. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 207–218.
- Демидов И. Н. Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 134–142.
- Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 171–182.
- Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Л.: Географгиз, 1949–1950. Кн. 1. 240 с.; кн. 2. 288 с.; кн. 3. 399 с.
- Елина Г. А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 57 с.
- Елина Г. А., Лукашов А. Д., Юрковская Т. К. Позднеледниковье и голоцен Восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 242 с.
- Елина Г. А., Лукашов А. Д., Токарев П. Н. Картографирование растительности и ландшафтов на временных срезах голоцена таежной зоны Восточной Фенноскандии. СПб.: Наука, 2005. 53 с.
- Заключительный информационный отчет по теме № 139 «Дегляциация Восточной части Скандинавского материкового ледника». Подпроект МПГК № 253 «Завершающий этап плейстоцена (1991–1995). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1996. 25 с.
- Зобков М. Б., Субетто Д. А., Тарасов А. Ю., Потахин М. С. Применение ГИС для реконструкции береговой линии Онежского озера в различные климатические периоды // Водные ресурсы: изучение и управление. Т. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 190–198.
- Информационная система идентификации растительных объектов на основе карпологических, палинологических и анатомических данных. URL: <http://botany-collection.bio.msu.ru> (дата обращения: 01.10.2020).
- Катунова В. В., Воротников В. П., Чкалов А. В. Сравнительный анализ ценофлоры черноольховых лесов Нижегородского Поволжья // Труды Гос. природного биосферного заповедника «Керженский». Т. 8. Нижний Новгород, 2016. 182 с.
- Квасов Д. Д. Происхождение котловины Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л.: Наука, 1976. С. 7–40.
- Куликовский М. С., Глушенко А. М., Генкал С. И., Кузнецова И. В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.
- Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры двудольных растений флоры европейской части СССР. Т. 1. Л.: Наука, 1978. 174 с.
- Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 172 с.
- Лаврова Н. Б. Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 143–148.
- Лосева Э. И. Атлас морских плейстоценовых диатомей европейского Северо-Востока СССР. СПб.: Наука, 1992. 272 с.
- Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951. Вып. 4. 619 с.
- Порывкин М. Н. Образование поперечных террас реки Вытегра и история развития Онежского озера // Тр. Гидропроекта. 1960. Сб. 3. С. 221–233.
- Пыльцевой анализ / Ред. И. М. Покровская. М.: Госгеоллиздат, 1950. 571 с.
- Субетто Д. А., Потахин М. С., Гурбич В. А., Шелехова Т. С. База данных «Палеогеография Онежского озера и его водосбора «PaleoOnego». Свидетельство о гос. регистрации № RU 2017620010. Зарег. в Рее-стре баз данных 09 января 2017 г.
- Субетто Д. А., Потахин М. С., Зобков М. Б., Тарасов А. Ю., Шелехова Т. С., Гурбич В. А. Применение геоинформационных технологий в палеоре-конструкции истории развития Онежского озера в позднеледниковье // Геоморфология. № 3. 2019. С. 83–90.
- Филимонова Л. В., Шелехова Т. С. Динамика уровня режима, зарастания и заторфовывания

озера Руоколампи (заповедник «Кивач») в голоцене // Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем Восточной Фенноскандии. Труды КарНЦ РАН. 2005. Вып. 8. С. 121–132.

Шелехова Т. С., Васько О. В., Демидов И. Н. Развитие природной среды юго-западного Прионежья в голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 226–232.

Шелехова Т. С., Васько О. В., Демидов И. Н. Палеоэкологические условия развития Северо-Западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене // Геология и полезные ископаемые. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 149–157.

Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Палеогеографические реконструкции развития территории Северо-Западной Карелии в голоцене (по данным изучения донных отложений малых озер) // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 9. С. 101–122. doi: 10.17076/lim1268

Шелехова Т. С., Субетто Д. А. Диатомовые водоросли донных отложений озер Заонежья: оценка современного состояния озер, реконструкция изменения уровня Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 88–105. doi: 10.17076/lim283

Шешина О. Н. О степени сходства палино- и фитоценозов и реставрации палеофитоценозов // Вестник МГУ. Сер. геол. 1980. № 4. С. 85–89.

Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. С. 41–42.

Юрковская Т. К. Растительный покров Карелии // Растительный мир Карелии и проблемы его охраны. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1993. С. 8–36.

Ekman I., Iljin V. Deglaciation, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // Glacial deposits in North-East Europe / Ehlers J., Kozarski S. and Gibbard P. (eds.). Rotterdam; Brookfield: A. A. Balkema, 1995. P. 195–209.

Grimm E. C. TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics software for pollen data // INQUA. Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter. 1990. No. 4. P. 5–7.

Hoek W. Z. Atlas to Palaeogeography of Lateglacial Vegetations. Utrecht; Amsterdam, 1997. 165 p.

Komarek J., Jankovska V. Review of the Green Algal Genus *Pediastrum*: implication for pollenanalytical research. Bibliotheca Phycologica, Band XX. Berlin; Stuttgart: Cramer, 1999. 127 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

Mölder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // Bull. Geol. Soc. Finland. 1967. Vol. 39. P. 199–217; 1968. Vol. 40. P. 151–170; 1969. Vol. 41. P. 235–251; 1970. Vol. 42. P. 129–144; 1971. Vol. 43. P. 203–220; 1972. Vol. 44. P. 141–149; 1973. Vol. 45. P. 159–179.

Parshall T. Documenting forest stand invasion: Fossil stomata and pollen in forest hollows // Article in Can. J. Bot. 2011. Vol. 77(10). P. 1529–1538.

Saarnisto M., Grönlund T., Ekman I. Lateglacial of Lake Onega – contribution to the history of the eastern Baltic basin // Quat. Intern. 1995. Vol. 27. P. 111–120.

Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Subetto D. A. Late Glacial and Holocene evolution of lake Syargozero based on micropaleontological evidence (Onega Lake basin, Karelia, Russia) // Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the International Conference. Yakutsk, 22–27 August, 2016 / Eds. S. Levina, R. Gorodnichev, I. Yadrinskii, P. Davydova. Yakutsk: North-Eastern Federal University, 2016. P. 103–105.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // Geol. Surv. Finland Bull. 1975. Vol. 274. P. 1–55; 1976. Vol. 284. P. 1–37; 1978. Vol. 296. P. 1–55; 1980. Vol. 312. P. 1–93.

Van Geel B. Non-pollen palynomorphs // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments / Eds. Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. Dordrecht: Kluwer, 2001. Vol. 3. P. 99–119.

Поступила в редакцию 12.10.2020

References

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayushchei sredy [Diversity of algal indicators in the environmental assessment]. Tel'-Aviv: PilliesStudio, 2006. 498 p.

Biologicheskie indikatory v paleoekologicheskikh issledovaniyakh: Atlas [Biological indicators in paleoecological studies. An atlas]. Ed. L. B. Nazarova. Kazan': Kazanskii un-t, 2013. 147 p.

Biske G. S., Lak G. Ts., Lukashov A. D., Goryunova N. N., Il'in V. A. Stroenie i istoriya kotloviny Onezhskogo ozera [Building and history of the Onega Lake basin]. Trudy In-ta geol. KFA N SSSR [Proceed. Inst. Geol. Karelian Br. Acad. Sci. USSR]. 1971. Iss. 7. 74 p.

Davydova N. N. Diatomovy vodorosli – indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene [Diatoms – indicators of the natural conditions of reservoirs in the Holocene]. Leningrad: Nauka, 1985. 244 p.

Demidov I. N. Donnye otlozheniya i kolebaniya urovnya Onezhskogo ozera v pozdnelednikov'e [Bottom sediments and fluctuations in the level of Lake Onega in the Late glacial]. Geol. i poleznye iskopaemye Karelii [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 207–218.

Demidov I. N. Degradatsiya pozdnevaldaiskogo oledneniya v basseine Onezhskogo ozera [Degradation of the Late Valdai glaciation in the basin of Lake Onega]. Geol. i poleznye iskopaemye Karelii [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 134–142.

Demidov I. N. O maksimal'noi stadii razvitiya Onezhskogo prilednikovogo ozera, izmenenii ego urovnya i glyatsioizostaticheskogo podnyatii poberezhii v pozdnelednikov'e [On the maximum stage of development of Onega glacial lake, changing its level and glacioisstatic rise of coasts in the late glacial]. Geol. i poleznye isko-

paemye Karelii [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 171–182.

Diatomovyi analiz. Opredelitel' iskopaemykh i sovremennykh diatomovykh vodoroslei [Diatom analysis. A key to fossils and modern diatoms]. Leningrad: Geografiz, 1949–1950. B. 1. 240 p.; B. 2. 288 p.; B. 3. 399 p.

Elina G. A. Printsipy i metody rekonstruktsii i kartirovaniya rastitel'nosti golotsena [Principles and methods of reconstruction and mapping of the Holocene vegetation]. Leningrad: Nauka, 1981. 57 p.

Elina G. A., Lukashov A. D., Yurkovskaya T. K. Pozdnelednikov'e i golotsen Vostochnoi Fennoskandii (paleorastitel'nost' i paleogeografiya) [Glacial and Holocene of East Fennoscandia (paleo-vegetation and paleogeography)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. 242 p.

Elina G. A., Lukashov A. D., Tokarev P. N. Kartografirovanie rastitel'nosti i landshaftov na vremennykh srezakh golotsena taezhnoi zony Vostochnoi Fennoskandii [Mapping of vegetation and landscapes on temporary sections of the Holocene of the taiga zone of Eastern Fennoscandia]. St. Petersburg: Nauka, 2005. 53 p.

Filimonova L. V., Shelekhova T. S. Dinamika urovnego rezhima, zarastaniya i zatorfovyvaniya ozera Ruokolampi (zapovednik "Kivach") v golotsene [Dynamics of the level regime, overgrowing, and peat formation of Lake Ruokolampi (Kivach Nature Reserve) in the Holocene]. *Bioraznoobrazie, dinamika i resursy bolotnykh ekosistem Vostochnoi Fennoskandii. Trudy KarNTs RAN* [Biodiversity, dynamics, and resources of bog ecosystems of Eastern Fennoscandia. Trans. KarRC RAS]. 2005. Iss. 8. P. 121–132.

Genkal S. I., Kulikovskii M. S., Mikheeva T. M., Kuznetsova I. V., Luk'yanova E. V. Diatomovye vodorosli planktona reki Svisloch' i ee vodokhranilishch [Diatoms in plankton of the Svisloch River and its reservoirs]. Moscow: Nauchnyi mir, 2013. 236 p.

Genkal S. I., Trifonova I. S. Diatomovye vodorosli planktona Ladozhskogo ozera i vodoemov ego basseina [Diatoms of plankton of Lake Ladoga and water bodies of its basin]. Rybinsk: Rybinskii dom pečati, 2009. 72 p.

Genkal S. I., Chekryzheva T. A. Tsentricheskie diatomovye vodorosli (Bacillariophyta, Centrophyceae) vodoemov Karelii [Centric diatoms (Bacillariophyta, Centrophyceae) of water bodies of Karelia]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2011. No. 1. P. 5–16.

Genkal S. I., Chekryzheva T. A., Komulainen S. F. Diatomovye vodorosli vodoemov i vodotokov Karelii [Diatoms of water bodies and watercourses of Karelia]. Ed. V. G. Devyatkin. Moscow: Nauchnyi mir, 2015. 202 p.

Grichuk V. P., Zaklinskaya E. D. Analiz iskopaemoi pyl'tsy i spor i ego primenenie v paleogeografii [Fossil pollen and spores analysis and its use in paleogeography]. Moscow: Geografiz, 1948. 223 p.

Informatsionnaya sistema identifikatsii rastitel'nykh ob'ektov na osnove karpologicheskikh, palinologicheskikh i anatomicheskikh dannykh [Information system for identification of plant objects based on carpological, palynological, and anatomical data]. URL: <http://botany-collection.bio.msu.ru> (accessed: 01.10.2020).

Katunova V. V., Vorotnikov V. P., Chkalov A. V. Sravnitel'nyi analiz tsenoflory chernool'khovykh lesov

Nizhegorodskogo Povolzh'ya [Comparative analysis of the cenoflora of black alder forests of the Nizhny Novgorod Volga region]. *Trudy Gos. prirod. biosfernogo zapoved. "Kerzhenskii"* [Proceed. Kerzhensky State Nature Reserve]. Vol. 8. Nizhnii Novgorod, 2016. 182 p.

Khotinskii N. A. Golotsen Severnoi Evrazii [Holocene of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka, 1977. P. 41–42.

Kulikovskii M. S., Glushenko A. M., Genkal S. I., Kuznetsova I. V. Opredelitel' diatomovykh vodoroslei Rossii [A key to diatoms of Russia]. Yaroslavl': Filigran', 2016. 804 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa i spory dvudol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Pollen and spores of bilobular plants of the flora in the European part of the USSR]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1978. 174 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa i spory rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Pollen and spores of plants in the European part of the USSR]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1972. 172 p.

Kvasov D. D. Proiskhozhdenie kotloviny Onezhskogo ozera [Origin of the Lake Onego Basin]. *Paleolimnologiya Onezhskogo ozera* [Paleolimnology of Lake Onego]. Leningrad: Nauka, 1976. P. 7–40.

Lavrova N. B. Razvitie rastitel'nosti basseina Onezhskogo ozera v khode degradatsii poslednego oledeneniya [Development of vegetation of the Onega Lake basin during the degradation of the last glaciations]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 143–148.

Loseva E. I. Atlas morskikh pleistotsenovykh diatomei evropeiskogo Severo-Vostoka SSSR [Atlas of Pleistocene marine diatoms of European North-East of the USSR]. St. Petersburg: Nauka, 1992. 272 p.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onego. An atlas]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 151 p.

Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR [A key to freshwater algae of the USSR]. Iss. 4. Moscow; Leningrad: AN SSSR, 1951. 619 p.

Poryvkin M. N. Obrazovanie poperechnykh terras reki Vytegra i istoriya razvitiya Onezhskogo ozera [Formation of the cross-sectional terraces of the Vytegra River and the history of the development of Lake Onega]. *Tr. Gidroproekta* [Proceed. Hydroproject]. 1960. Vol. 3. P. 221–233.

Pyl'tsevoi analiz [Pollen analysis]. Ed. I. M. Pokrovskaya. Moscow: Gosgeolizdat, 1950. 571 p.

Shelekhova T. S., Vas'ko O. V., Demidov I. N. Razvitie prirodnoi sredy yugo-zapadnogo Prionezh'ya v golotsene [Paleoecological conditions of development of the Northwest Prionezhye in the Late glacial and Holocene]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 226–232.

Shelekhova T. S., Vas'ko O. V., Demidov I. N. Paleoekologicheskie usloviya razvitiya Severo-Zapadnogo Prionezh'ya v pozdnelednikov'e i golotsene [Paleoecological conditions for the development of the Northwestern Onega region in the Late Glacial and Holocene]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 149–157.

Shelekhova T. S., Lavrova N. B. Paleogeograficheskie rekonstruktsii razvitiya territorii severo-zapadnoi Karelii v golotsene po dannym izucheniya donnykh otlozhenii mal'nykh ozer [Paleogeographic reconstruction of the development of the territory of northwestern Karelia in the Holocene according to the study of the sediments of small lakes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 9. P. 101–122. doi: 10.17076/lim1268

Shelekhova T. S., Subetto D. A. Diatomovye vodorosli donnykh otlozhenii ozer Zaonezh'ya: otsenka sovremennogo sostoyaniya ozer, rekonstruktsiya izmeneniya urovnya Onezhskogo ozera [Diatoms in the bottom sediments of Zaonezhye lakes: assessment of the present state of the lakes and reconstruction of Lake Onego level variations]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 5. P. 88–105. doi: 10.17076/lim283

Sheshina O. N. O stepeni skhodstva palino- i fitosenozov i restavratsii paleofitotsenozov [About the degree of similarity of palino- and phytocenoses and restoration of paleophytosenosis]. *Vestnik MGU. Ser. geol.* [Moscow Univ. Bull. Ser. Geol.]. 1980. No. 4. P. 85–89.

Subetto D. A., Potakhin M. S., Gurbich V. A., Shelekhova T. S. Baza dannykh "Paleogeografiya Onezhskogo ozera i ego vodosbora "PaleoOnego". Svidetel'stvo o gos. registratsii bazy dannykh № RU 2017620010. Zareg. v Reestre baz dannykh 09 yanvarya 2017 g. [Database 'Paleogeography of Lake Onega and its catchment area *PaleoOnego*'. Certificate of state registration No. RU 2017620010. Reg. in the Registry of databases on January 09, 2017].

Subetto D. A., Potakhin M. S., Zobkov M. B., Tarasov A. Yu., Shelekhova T. S., Gurbich V. A. Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologii v paleorekonstruktsii istorii razvitiya Onezhskogo ozera v pozdnelednikov'e [Application of geo-information technologies in the paleoreconstruction of the history of the development of Onega Lake in the late glacial]. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. No. 3. 2019. P. 83–90.

Yurkovskaya T. K. Rastitel'nyi pokrov Karelii [Vegetation cover of Karelia]. *Rastitel'nyi mir Karelii i probl. ego okhrany* [The flora of Karelia and probl. of its protection]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. P. 8–36.

Zaklyuchitel'nyi informatsionnyi otchet po teme № 139 "Deglyatsiatsiya Vostochnoi chasti Skandinavskogo materikovogo lednika". Podproekt MPGK № 253 "Zavershayushchii etap pleistotsena (1991–1995)" [The final information report on the topic No. 139 'Deglaciation of the Eastern part of the Scandinavian mainland glacier'. Underproject MPGK No. 253 'The Final Stage of the Pleistocene (1991–1995)']. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1996. 25 p.

Zobkov M. B., Subetto D. A., Tarasov A. Yu., Potakhin M. S. Primenenie GIS dlya rekonstruktsii beregovoi linii Onezhskogo ozera v razlichnye klimaticheskie periody [Application of GIS for the reconstruction

of the shoreline of Lake Onega in different climatic periods]. *Vodnye resursy: izuchenie i upravlenie* [Water resources: study and management]. Vol. 1. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2016. P. 190–198.

Ekman I., Iljin V. Deglaciation, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas. *Glacial deposits in North-East Europe*. Ehlers J., Kozarski S. and Gibbard P. (eds.). Rotterdam; Brookfield: A. A. Balkema, 1995. P. 195–209.

Grimm E. C. TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics software for pollen data. *INQUA. Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter*. 1990. No. 4. P. 5–7.

Hoek W. Z. Atlas to palaeogeography of Lateglacial vegetations. Utrecht; Amsterdam, 1997. 165 p.

Komarek J., Jankovska V. Review of the Green Algal Genus *Pediastrum*: implication for pollenanalytical research. *Bibliotheca Phycologica*, Band XX. Berlin; Stuttgart: Cramer, 1999. 127 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

Mölder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII. *Bull. Geol. Soc. Finland*. 1967. Vol. 39. P. 199–217; 1968. Vol. 40. P. 151–170; 1969. Vol. 41. P. 235–251; 1970. Vol. 42. P. 129–144; 1971. Vol. 43. P. 203–220; 1972. Vol. 44. P. 141–149; 1973. Vol. 45. P. 159–179.

Parshall T. Documenting forest stand invasion: Fossil stomata and pollen in forest hollows. *Articlin Can. J. Bot.* 2011. Vol. 77(10). P. 1529–1538.

Saarnisto M., Grönlund T., Ekman I. Lateglacial of Lake Onega – contribution to the history of the eastern Baltic basin. *Quat. Intern.* 1995. Vol. 27. P. 111–120.

Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Subetto D. A. Late Glacial and Holocene evolution of lake Syrgozero based on micropaleontological evidence (Onega Lake basin, Karelia, Russia). *Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the International Conference. Yakutsk, 22–27 August, 2016*. Eds. S. Levina, R. Gorodnichev, I. Yadrinkhinski, P. Davydova. Yakutsk: North-Eastern Federal University, 2016. P. 103–105.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI. *Geol. Surv. Finland Bull.* 1975. Vol. 274. P. 1–55; 1976. Vol. 284. P. 1–37; 1978. Vol. 296. P. 1–55; 1980. Vol. 312. P. 1–93.

Van Geel B. Non-pollen palynomorphs. *Tracking Environ. Change Using Lake Sediments*. Eds. Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. Dordrecht: Kluwer, 2001. Vol. 3. P. 99–119.

Received October 12, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шелехова Татьяна Станиславовна

старший научный сотрудник лаб. геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, к. г. н.
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: Shelekh@krc.karelia.ru

Тихонова Юлия Сергеевна

старший лаборант-исследователь лаб. геохимии,
четвертичной геологии и геоэкологии
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: yula_tihonova@mail.ru

Лазарева Оксана Васильевна

ведущий географ лаб. геохимии, четвертичной геологии
и геоэкологии
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ox-laz@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Shelekhova, Tatyana

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Shelekh@krc.karelia.ru

Tikhonova, Yuliya

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: yula_tihonova@mail.ru

Lazareva, Oksana

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ox-laz@yandex.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 574.5: [546.16 + 546.17]:001.891.57 (261.243)

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ SPBEM-2: АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ К ЗАДАНИЮ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

**О. М. Владимирова¹, Т. Р. Еремина¹, А. В. Исаев², В. А. Рябченко²,
О. П. Савчук³**

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Балтик Нест институт, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета, Швеция

Проведен анализ чувствительности 3-мерной биогеохимической модели SPBEM-2 к включению в уравнения модели растворенного органического азота и фосфора, поступающего с речным стоком в виде переменных модели. Как показали результаты расчетов, учет фосфорной и азотной нагрузки, поступающей с речным стоком в составе лабильного растворенного органического вещества (РОВ), заметно отражается на пространственном распределении потока седиментации азота и фосфора, а именно приводит к увеличению потока седиментации в приустьевых участках. Оседание на дно детрита азота и фосфора увеличивается в 2,5 и 3 раза, соответственно, снижается величина первичной продукции, значения которой завышались при расчетах без учета уравнений для РОВ в восточной части Финского залива. Включение в уравнения модели переменных, описывающих трансформацию РОВ, позволяет отказаться от искусственного завышения скорости оседания детрита и использовать в модели значения, сопоставимые с наблюдаемыми.

Ключевые слова: Балтийское море; моделирование; эвтрофикация; биогенные соединения; органическое вещество, речные нагрузки.

**O. M. Vladimirova, T. R. Eremina, A. V. Isaev, V. A. Ryabchenko,
O. P. Savchuk. MODEL SPBEM-2 DEVELOPMENT: ANALYSIS OF
SENSITIVITY TO THE DISSOLVED ORGANIC MATTER SETTING**

The sensitivity of the 3-D biogeochemical model SPBEM-2 to the inclusion of dissolved organic nitrogen and phosphorus input with river runoff as variables in the model equations was analyzed. The inclusion of the phosphorus and nitrogen loads brought with labile dissolved organic matter (DOM) in the river runoff into the calculations noticeably influences the spatial distribution of the nitrogen and phosphorus sedimentation flux, name-

ly, leads to an increase in the sedimentation flux in estuarine areas. The sedimentation of detrital nitrogen and phosphorus to the bottom increases 2.5 and 3 times, respectively. The amount of primary production decreases versus the overestimated values in the calculations without DOM equations for the eastern part of the Gulf of Finland. The inclusion of variables describing DOM transformations into the model equations helps avoid the artificial overestimation of the detritus sedimentation rate and use in the model values comparable to the observed ones.

Key words: Baltic Sea; modelling; eutrophication; nutrients; organic matter; river loads.

Введение

Эвтрофикация была и остается одной из ключевых проблем Балтийского моря. Около 75 % азотной нагрузки и не менее 95 % фосфорной поступает в него по рекам или в виде прямых водных сбросов. В 2007 году Хельсинкской комиссией принят План действий по Балтийскому морю, направленный на восстановление надлежащего экологического состояния морской среды Балтики к 2021 году. В нем, на основании национальных данных за 1997–2003 гг., были установлены максимально допустимые квоты (MAI) азота и фосфора, при которых можно достигнуть хорошего экологического состояния, и соответствующие сокращения поступления биогенов для каждого субрегиона Балтийского моря [HELCOM..., 2007].

Благодаря принятым мерам по защите и охране вод [The Gulf..., 2016] внешняя нагрузка биогенными элементами была снижена на 30–40 %. Но, согласно отчету Хельсинкской комиссии, не во всех регионах Балтийского моря достигнуты хорошие показатели. Так, например, несмотря на то, что в Финском заливе нагрузка по поступлению фосфора снизилась на 59 %, залив продолжает оставаться одним из самых эвтрофированных районов Балтики [HELCOM..., 2018].

До настоящего времени в применяемых моделях эвтрофикации Балтийского моря RCO-SCOB [Killworth и др., 1991; Eilola и др., 2009], ERGOM [Pacanowski и др., 1993], BALTSEM [Savchuk, Wulff, 1996; Gustafsson, 2003] и SPBEM [Neelov и др., 2003; Savchuk и др., 2009] при описании биогеохимического круговорота биогенных соединений фосфора и азотсодержащее растворенное органическое вещество не рассматривалось в виде самостоятельной переменной. Это приводит к тому, что часть фосфорной и азотной нагрузки, поступающей с речным стоком в составе органического вещества, не учитывается полностью в балансе этих соединений. Для учета речных нагрузок в указанных выше моделях обычно используются известные данные по речным

нагрузкам в Балтике, собираемые Хельсинкской комиссией [The Gulf..., 2016], но при этом применяются различные подходы в описании учета биодоступной части органики. В частности, органические нагрузки поступают в виде детрита, а коэффициенты доступности отличаются от модели к модели. В результате возникают большие различия между фактическими поступлениями питательных веществ, используемыми в разных моделях, особенно для фосфора [Meier и др., 2018], что приводит к существенным расхождениям в оценке развития эвтрофикации в Балтийском море. При этом та часть нагрузки, которая является стойкой фракцией растворенного органического азота и фосфора, просто «отбрасывается», а «отброшенное» количество может отличаться от модели к модели в зависимости от принимаемых коэффициентов биодоступности [Meier и др., 2018]. Вся же биодоступная часть считается сосредоточенной только во взвешенной форме. В результате в мелководных приустьевых участках происходит интенсивное выпадение детрита на дно, что приводит к искусственному занижению скорости оседания при проведении расчетов на модели для сохранения баланса биогенных элементов пелагиали.

Для более реалистичного описания оседания детрита биогеохимический модуль модели SPBEM [Savchuk, 2002] был расширен за счет включения уравнений, описывающих трансформацию растворенного азот- и фосфорсодержащего органического вещества ($POB_{N,P}$). Это позволило в модели SPBEM-2 [Vladimirova и др., 2018; Isaev и др., 2020] увеличить скорость оседания детрита и использовать в расчетах значения, сопоставимые с наблюдаемыми в природе [Sarhou и др., 2005].

Кроме того, как указывалось выше, в моделях эвтрофикации Балтийского моря не учитывается стойкая фракция $POB_{N,P}$. Однако, по имеющимся оценкам, для Балтики стойкая фракция POB_N и POB_P составляет 75 и 36 % соответственно [Hoikkala и др., 2015; Savchuk, 2018] и может вносить свой вклад в баланс азота и фосфора в экосистеме Финского залива.

В настоящее время такие оценки для экосистемы Финского залива отсутствуют.

Целью настоящей работы является определение чувствительности модели SPBEM-2 к введенным в биогеохимический модуль переменным в виде двух форм растворенной лабильной и стойкой органики ($POB_{N,P}$). Для этого в работе исследуется влияние разных способов задания лабильной формы органического азота и фосфора, поступающих с речными нагрузками, на потоки вещества в пелагической системе Финского залива, а также чувствительность первичной продукции и содержания детрита в пелагиали к изменению скорости оседания детрита и минерализации.

Материалы и методы

Для проведения численных расчетов использовались сведения из нескольких источников: из базы, сформированной в рамках проведения в 2014 г. года Финского залива [The Gulf..., 2016], которая содержит данные натурных наблюдений за период с 1999 по 2014 год; данные Стокгольмского университета [BED...]; данные, полученные в экспедициях РГГМУ.

Расчеты проводились с использованием Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM-2, которая представляет собой модульную систему. Гидродинамический модуль основан на модели Массачусетского института технологий в гидростатическом приближении (MITgcm) [Hibler, 1980; Gaspar и др., 1990; Zhang, Hibler, 1997]. Биогеохимический модуль, описанный в работе [Savchuk, 2002], был расширен путем добавления уравнений, описывающих трансформацию двух форм (лабильной и стойкой) растворенной органики [Vladimirova и др., 2018; Isaev и др., 2020]. Биогеохимический модуль представляет собой систему уравнений переноса и трансформации с функцией неконсервативности, которая описывает процессы переноса вещества между компонентами в результате химико-биологических взаимодействий, формирующих соответствующие потоки азота и фосфора в гомогенном объеме воды и прилегающих к нему донных отложениях.

Скорость и характер протекания биогеохимических процессов зависят от гидрофизических процессов в морской среде, что обуславливает необходимость адекватного воспроизведения на модели циркуляции вод и термохалинной структуры. Выполненная верификация результатов модельных расчетов по данным натурных наблюдений показала, что модель с достаточной степенью соответствия воспроизводит се-

зонный ход гидрофизических и гидрохимических характеристик [Isaev и др., 2020].

Для оценки чувствительности модели к введению в биогеохимический модуль уравнений, описывающих трансформацию растворенного органического вещества, поступающего с речным стоком, проведен численный эксперимент (run1). При этом опорным численным экспериментом (run0) принят результат расчетов, приведенный в [Vladimirova et al., 2018]. В опорном эксперименте с введением двух форм растворенного органического вещества речная нагрузка учитывается полностью и поступает в виде лабильной и стойкой фракций $POB_{N,P}$.

В run1 поступающая с суши нагрузка лабильной фракции органического азота и фосфора задавалась в виде детрита. Это позволяет приблизить модель SPBEM-2 к моделям, в которых растворенные формы органического азота и фосфора не были описаны самостоятельными переменными. Стойкие фракции растворенных органического азота и фосфора, как и все остальные переменные модели, оставались без изменений.

Добавление уравнений, описывающих формы органического азота и фосфора, позволяет провести численные эксперименты по изменению скорости оседания детрита [Сергеев и др., 1979; Sarthou et al., 2005; Bach et al., 2012] и увеличить ее, например, с 2,6 до 6,6 м/сут (при 10 °C).

Для проведения исследования чувствительности к изменению параметров, описывающих процессы транспорта и трансформации детрита и $POB_{N,P}$ на модели SPBEM-2, все эксперименты выполнялись для периода с 2009 по 2014 г. Расчетная область представлена на рис. 1. Расчеты проводились для Финского залива от Невской губы до меридиана 24.08° в. д., где расположена жидкая граница. Горизонтальное разрешение сферической сетки составляет 2' по широте и 4' по долготе (~ 2 морских мили), вертикальное разрешение в z-координатной области – 3 м от поверхности до дна.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты расчетов, разные способы задания поступления речных нагрузок сильно отражаются на пространственном распределении потока седиментации азота и фосфора. Для run1, по сравнению с run0, в приустьевых участках наблюдается увеличение потока седиментации детрита, в то время как в центральной части залива поток уменьшается. Среднегодовой поток по всей площади Финского залива увеличивается в 2–2,5 раза для азота (рис. 2), а для фосфора – в 2,5–3 раза (рис. 3).

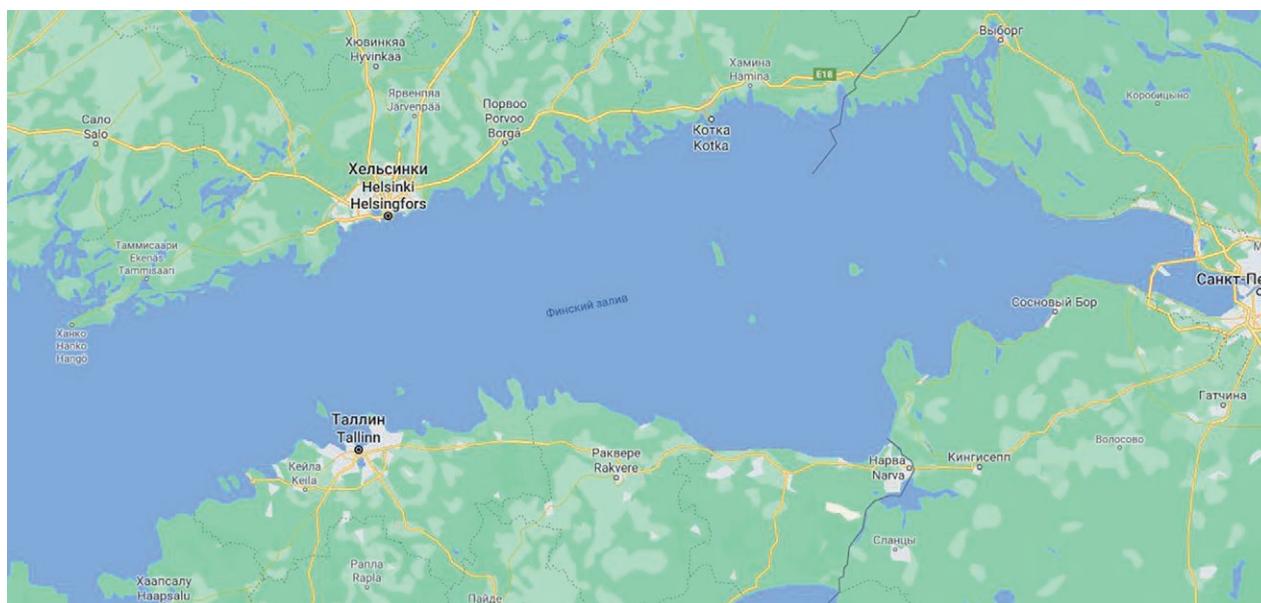


Рис. 1. Финский залив Балтийского моря

Fig. 1. The Gulf of Finland of the Baltic Sea

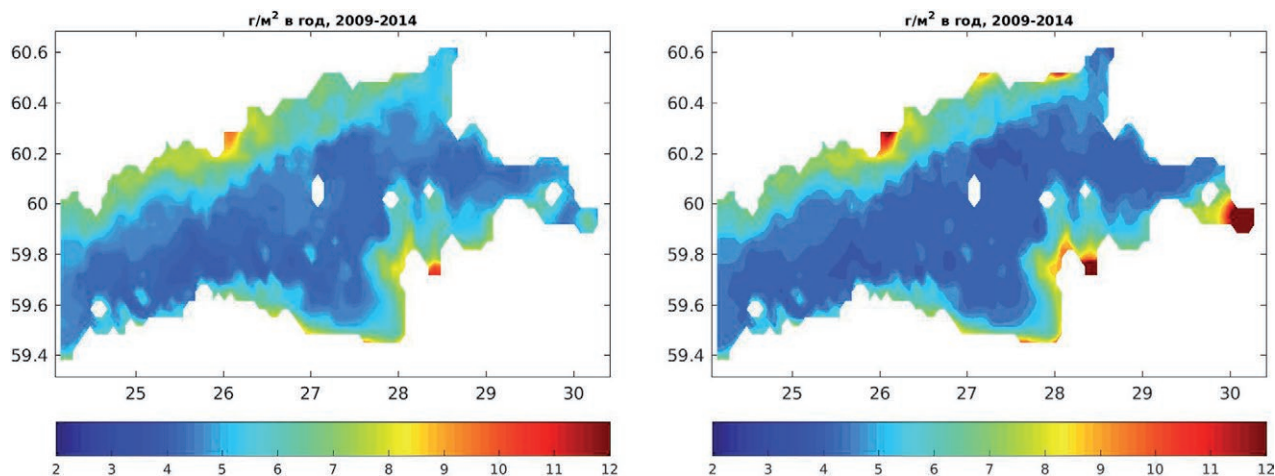


Рис. 2. Среднегодовой поток седиментации азота в run0 (слева) и в случае run1 (справа)

Fig. 2. Average annual flow of nitrogen sedimentation in run0 (left) and in the case of run1 (right)

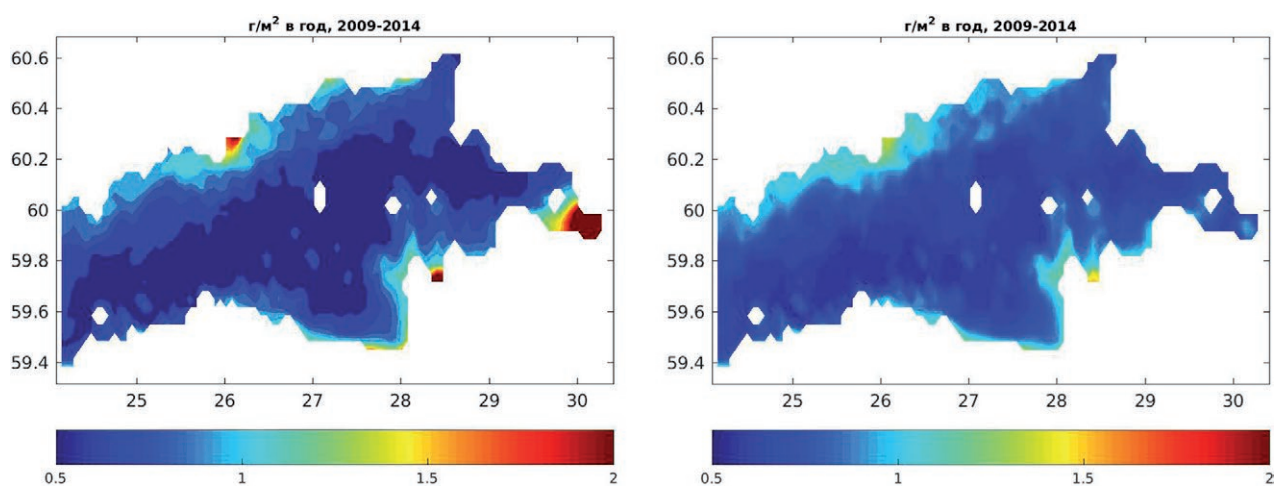


Рис. 3. Среднегодовой поток седиментации фосфора в run0 (слева) и в случае run1 (справа)

Fig. 3. Average annual flow of phosphorus sedimentation in run0 (left) and in the case of run1 (right)

Таблица 1. Сравнение потоков седиментации и выхода из донных отложений для фосфора

Table 1. Comparison of sedimentation and output flows from bottom sediments for phosphorus

Фосфор Phosphorus	Run0, т/год tons/year		Run1, т/год tons/year		$(\text{OutP}_{\text{run1}} - \text{OutP}_{\text{run0}}) / \text{OutP}_{\text{run1}}$ (%)	$(\text{SedP}_{\text{run1}} - \text{SedP}_{\text{run0}}) / \text{SedP}_{\text{run1}}$ (%)	$\text{SedP}_{\text{run0}} - \text{OutP}_{\text{run0}}$, т/год tons/year	$\text{SedP}_{\text{run1}} - \text{OutP}_{\text{run1}}$, т/год tons/year
	Выход из донных отложений $\text{OutP}_{\text{run0}}$ Output from bottom sediments $\text{OutP}_{\text{run0}}$	Седиментация $\text{SedP}_{\text{run0}}$ Sedimentation $\text{SedP}_{\text{run0}}$	Выход из донных отложений $\text{OutP}_{\text{run1}}$ Output from bottom sediments $\text{OutP}_{\text{run1}}$	Седиментация $\text{SedP}_{\text{run1}}$ Sedimentation $\text{SedP}_{\text{run1}}$				
2009	18799	22006	18975	24342	0,92	9,60	3206	5367
2010	24876	17890	25391	18520	2,03	3,40	-6986	-6871
2011	21975	19390	22556	20929	2,58	7,36	-2584	-1626
2012	14834	17340	15339	18146	3,29	4,45	2505	2807
2013	17186	18216	17848	18367	3,71	0,82	1030	519
2014	16873	16759	17476	17378	3,45	3,56	-113	-98
Среднее Average					2,66	4,87	-490	16

По результатам расчетов, разные способы поступления биогенов с речным стоком приводят к изменениям интенсивности биогеохимических процессов, что может быть показано на примере анализа сравнения первичной продукции органического вещества. В run0 первичная продукция в среднем за расчетный период составляет $184,55 \cdot 10^3$ т/год для западной части Финского залива, для восточной части – $208,18 \cdot 10^3$ т/год. По результатам run1 первичная продукция составляет для западной части $177,29 \cdot 10^3$ т/год, для восточной – $204,86 \cdot 10^3$ т/год. Таким образом, сокращение первичной продукции в восточной части происходит незначительно и составляет в среднем 1,5 %, в то время как в западной части Финского залива сокращение достигает 4 %. Данный эффект связан с уменьшением скорости рециклинга. Поступающий в приустьевые участки детрит в run1 довольно быстро оседает на дно, что обуславливает его недостаток в центральной части и приводит к уменьшению первичной продукции.

Сравнение потоков седиментации и выхода из донных отложений по результатам run0 по-

казало, что выход из донных отложений фосфора преобладает над потоком оседания в среднем на 490 т/год (табл. 1). В расчете run1, напротив, в среднем за 2009–2014 гг. поток седиментации превышает поток выхода фосфора из донных отложений, и их разница составляет 16 т/год. Расчет изменения разности потоков для run0 и run1 показал увеличение седиментации на 4,8 %. Максимальные значения для разницы потоков седиментации и выхода фосфора из донных отложений выявлены в 2010 году, что связано с обширной зоной гипоксии [Владимирова и др., 2018], образовавшейся в восточной части Финского залива в летний период.

Для азота как в случае run0, так и в случае run1 преобладает поток седиментации. Прирост выхода азота из донных отложений изменяется от 0,2 до 2,6 % ежегодно, а потока седиментации – от 0 до 4,9 %. В целом разность потоков составляет в среднем $100 \cdot 10^3$ т/год, а седиментация увеличивается на 3,3 % по отношению к run0.

Сравнительный анализ потока выхода фосфора из донных отложений с имеющимися данными натурных экспериментов [Conley и др.,

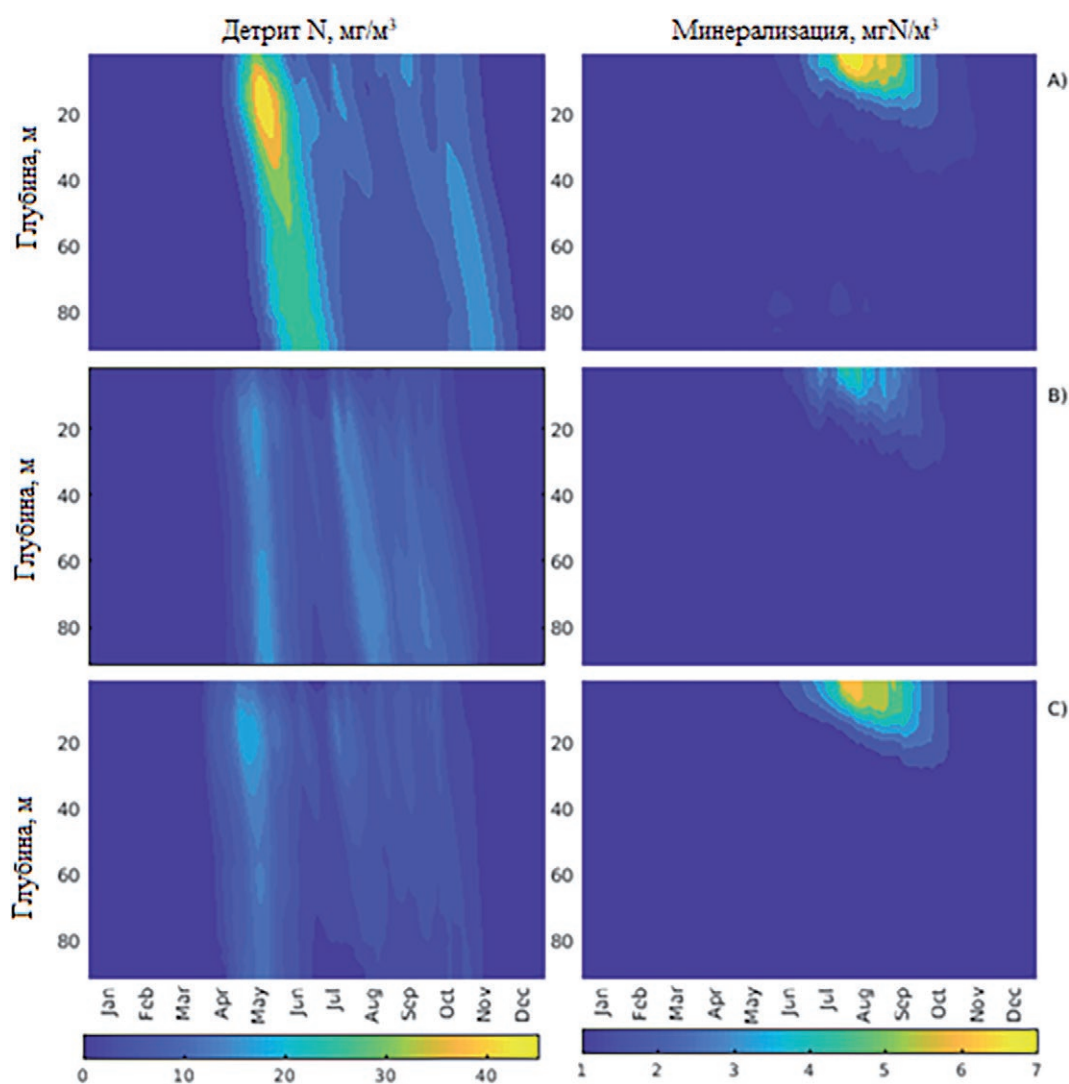


Рис. 4. Сезонная динамика оседания детрита (слева) и минерализации (справа), осредненная за 2009–2014 гг.:

A) скорость оседания детрита 2,6 м/сут при 10 °С, скорость минерализации 0,004 сут⁻¹ (при 10 °С);
 B) скорость оседания детрита при 10 °С 6,6 м/сутки, скорость минерализации 0,004 сут⁻¹ (при 10 °С);
 C) скорость оседания детрита при 10 °С 6,6 м/сут, скорость минерализации детрита при 10 °С установлена равной 0,088 сут⁻¹

Fig. 4. Seasonal dynamics of detritus settling (left column) and mineralization (right column) averaged over 2009–2014:

A) detritus sinking velocity at 10 °С is set as 2.6 m/day, detritus mineralization rate at 10 °С is set as 0.004 day⁻¹, B) detritus sinking velocity at 10 °С is set as 6.6 m/day, detritus mineralization rate at 10 °С is set as 0.004 day⁻¹, C) detritus sinking velocity at 10 °С is set as 6.6 m/day, detritus mineralization rate at 10 °С is set as 0.088 day⁻¹

1997; Pitkänen и др., 2001; Lukkari, 2008; Norkko et al., 2015; Berezina et al., 2019] показал, что модельные потоки (0,1–0,22 ммоль Р/м² в сутки) согласуются с экспериментальными (0,038–2,7 ммоль Р/м² в сутки), которые были получены в различные годы летнего периода с 1993 по 2015 г.

Проведен ряд численных экспериментов по изменению скорости оседания детрита. Первоначально скорость оседания детрита со-

ставляла 2,6 м/сут, скорость минерализации – 0,004 сут⁻¹ (рис. 4, А) [Vladimirova и др., 2018]. В первом эксперименте скорость оседания детрита была увеличена в 2,5 раза, до 6,6 м/сут (при 10 °С). На рис. 4 (В) видно, что происходит уменьшение концентрации детрита в пелагиали за счет более быстрого оседания и, как следствие, уменьшение минерализации в фотическом слое. Во втором эксперименте скорость минерализации была увеличена более чем в 20

раз, до $0,088 \text{ сут}^{-1}$ (при 10°C) (рис. 4, С), что позволяет сохранить баланс биогенных элементов в экосистеме залива.

Численные эксперименты показали, что увеличение скорости оседания детрита и скорости минерализации позволило получить оценки первичной продукции, которые в большей степени соответствуют наблюдаемым в Финском заливе [Isaev и др., 2020]. Среднее значение первичной продукции по результатам расчетов [Vladimirova и др., 2018] составляло $0,79 \pm 0,52 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ (табл. 2). После увеличения скорости оседания детрита и величины минерализации среднее значение первичной продукции уменьшилось до $0,44 \pm 0,39 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, что более соответствует величине продукции по данным наблюдений в Финском заливе – $0,50 \pm 0,21 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ [Platt и др., 1989].

Таблица 2. Статистика первичной продукции фитопланктона ($\text{мгС/м}^2/\text{сут}$), усредненная за весь период численных экспериментов

Table 2. Statistics of the phytoplankton primary production ($\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) averaged over the entire period of numerical experiments

	Obs	VL2018	Wg3	New
mean	0,50	0,79	0,32	0,44
std	0,21	0,52	0,30	0,39

Примечание. Obs – измерения, VL2018 – по модели [Владимирова и др., 2018], Wg – с увеличенной скоростью оседания, New – с увеличенной скоростью минерализации детрита.

Note. Obs – measurements, VL2018 – as simulated [Vladimirova et al., 2018], Wg – with increased sinking velocity, New – with additionally increased mineralization rate of detritus.

Выводы

Выполненные численные эксперименты показали, что разные способы задания поступления биогенных элементов, а именно задание лабильной фракции $\text{POB}_{\text{N,P}}$ в виде детрита, влияют на интенсивность процессов седиментации, выхода из донных отложений и образования первичной продукции.

При задании лабильной фракции $\text{POB}_{\text{N,P}}$ самостоятельными переменными выход фосфора из донных отложений больше потока оседания на 490 т/год, а в случае задания $\text{POB}_{\text{N,P}}$ в виде детрита поток седиментации становится преобладающим и превышает поток фосфора из донных отложений на 16 т/год. Изменение соотношения и направления этих потоков отразилось на первичной продукции и привело к заметному уменьшению ее величины в западной части Финского залива на 4 %. Наиболее заметное увеличение потока седиментации

наблюдается в приустьевых районах, тогда как в центральной части Финского залива он уменьшается. Исходя из полученных результатов, данный эксперимент показывает, что учет лабильной фракции POB в виде детрита приводит к увеличению потока седиментации и сокращению первичной продукции, в особенности для западной части Финского залива.

Важным результатом модификации модели можно считать наиболее сопоставимое представление переменных детрита по отношению к наблюдаемым в природе. Использование в модели новых скоростей оседания показывает, что для выполнения условий сохранения баланса биогенных элементов в фотическом слое необходимо увеличить скорость минерализации. Данный эксперимент позволил получить лучшее соответствие модельных оценок первичной продукции данным наблюдений.

Работа О. М. Владимировой и Т. Р. Ереминой выполнена в рамках государственного задания № FSZU-2020–0009, В. А. Рябченко и А. В. Исаева – в рамках государственного задания по теме 0128-2021-0014.

Литература

- Владимирова О. М., Еремина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А., Савчук О. П. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 72–82.
- Сергеев Ю. Н., Колодочка А. А., Круммель Х. Д., Кулеш В. П., Савчук О. П. Моделирование процессов переноса и трансформации вещества в море. Л.: ЛГУ, 1979.
- Bach L. T., Riebesell U., Sett S., Febiri S., Rzepka P., Schulz K. G. An approach for particle sinking velocity measurements in the 3–400 μm size range and considerations on the effect of temperature on sinking rates // Mar Biol. 2012. Vol. 159. P. 1853–1864.
- BED–Data Assimilation System and Baltic Environment Database at the Baltic Nest Institute, Stockholm University. URL: <http://nest.su.se/das> (дата обращения: 5.04.2018).
- Berezina N. A., Maximov A. A., Vladimirova O. M. Influence of benthic invertebrates on phosphorus flux at the sediment–water interface in the easternmost Baltic Sea // Marine Ecol. Progr. Ser. 2019. Vol. 608. P. 33–43.
- Conley D. J., Stockenberg A., Carman R., Johnstone R. W., Rahm L., Wulff F. Sediment–water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea // Estuar Coast Mar Sci. 1997. Vol. 45. P. 591–598.
- Eilola K., Meier H. E. M., Almroth E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study // J. Mar. Syst. 2009. Vol. 75(1–2). P. 163–184. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.08.009
- Gaspar P., Gregoris Y., Lefevre J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic ver-

tical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson B. G. A time-dependent coupled-basin model of the Baltic Sea, Earth Sciences Centre, Göteborg University C47. 2003. 61 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan, HELCOM Extraordinary Ministerial Meeting. 2007.

HELCOM Thematic assessment of eutrophication 2011–2016. *Baltic Sea Environ. Proceed.* 2018. No. 156.

Hibler W. D., III. Modeling a variable thickness sea ice cover, *Monthly Weather Review*, 1980. Vol. 108(12). P. 1943–1973. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1943:MAVTSI>2.0.CO;2

Hoikkala L., Kortelainen P., Soinne H., Kuosa H. Dissolved organic matter in the Baltic Sea // *J. Mar. Syst.* 2015. Vol. 142. P. 47–61. doi: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.005/

Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // *Water (Switzerland)*. 2020. Vol. 12(5). Art. 1307. doi: 10.3390/W12051307

Killworth P. D., Stainforth D., Webb D. J., Pateron S. M. The development of a free-surface Brian – Cox – Semtner ocean model // *J. Phys. Oceanogr.* 1991. Vol. 21(9). P. 1333–1348.

Lukkari K. Chemical characteristics and behaviour of sediment phosphorus in the northeastern Baltic Sea // *Finn. Inst. Mar. Res. Contrib.* 2008. Vol. 17. P. 1–64.

Meier H. E. M., Edman M. K., Eilola K. J., Placke M., Neumann T., Andersson H. C., Brunnabend S.-E., Dieterich C., Frauen C., Friendland R., Gröger M., Gustafsson B. G., Gustafsson E., Isaev A., Kniebusch M., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S., Savchuk O. P. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // *Front. Mar. Sci.* 2018. Vol. 5. P. 440. doi: 10.3389/fmars.2018.00440

Neelov I. A., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P., Vankevich R. E. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with a 3D model // *Proceed. Est. Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2003. Vol. 52. P. 346–359.

Norkko J., Gammal J., Hewitt J. E., Josefson A. B., Carstensen J., Norkko A. Seafloor ecosystem function relationships: in situ patterns of change across gradi-

ents of increasing hypoxic stress // *Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 1424–1439.

Pacanowski R. C., Dixon K., Rosati A. The GFDL Modular Ocean Model Users Guide, version 1.0 GFDL Ocean Group, Technical Report No. 2, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, New Jersey, USA, 1993.

Pitkänen H., Lehtoranta J., Räsänen A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial eastern Gulf of Finland, Baltic Sea // *Ambio*. 2001. Vol. 30. P. 195–201.

Platt T., Harrison W. G., Lewis M. R., Li W. K. W., Sathyendranath R. E., Smith R. E., Vezina A. F. Biological production of the oceans, the case for a consensus // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989. Vol. 52. P. 78–88.

Sarthou G., Timmermans K. R., Blain S., Tréguer P. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: A review // *J. Sea Res.* 2005. Vol. 53. P. 25–42.

Savchuk O., Wulff F. Biogeochemical transformations of nitrogen and phosphorus in the marine environment – Coupling hydrodynamic and biogeochemical processes in models for the Baltic Proper / Stockholm University. Systems ecology contributions. 1996. No. 2. 79 p.

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // *J. Mar. Sys.* 2002. Vol. 32. P. 235–280.

Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629. P. 209–224. doi: 10.1007/s10750-009-9775-z

Savchuk O. P. Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016 // *Front. Mar. Sci.* 2018. Vol. 5. P. 95. doi: 10.3389/fmars.2018.00095

The Gulf of Finland assessment / Eds. M. Raateoja, O. Setälä. Reports of the Finnish Environment Institute 27. Finnish Environ. Institute. 2016. 363 p.

Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Modelling dissolved organic nutrients in the Gulf of Finland // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 90–101.

Zhang J., Hibler W. D., III. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (C4). P. 8691–8702.

Поступила в редакцию 25.12.2020

References

Sergeev Y. N., Kolodochka A. A., Krummel H.-D., Kulesh V. P., Savchuk O. P. Modelirovanie protsessov perenosa i transformatsii veshchestva v more [Modelling of the transport and transformation processes in the Sea]. Leningrad: LGU, 1979. 292 p.

Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model'nye otsenki sostavlyayushchikh balans azota i fosfora v ekosisteme Finskogo zaliva [Model estimates of nitrogen and phosphorus budget components for the Gulf of Finland ecosystem]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. Russ. St. Hydrometeorol. Univ.] 2018. No. 53. P. 72–82.

Bach L. T., Riebesell U., Sett S., Febiri S., Rzepka P., Schulz K. G. An approach for particle sinking velocity measurements in the 3–400 µm size range and considerations on the effect of temperature on sinking rates. *Mar. Biol.* 2012. Vol. 159. P. 1853–1864.

BED – Data Assimilation System and Baltic Environment Database at the Baltic Nest Institute, Stockholm University. URL: <http://nest.su.se/das> (accessed: 5.04.2018).

Berezina N. A., Maximov A. A., Vladimirova O. M. Influence of benthic invertebrates on phosphorus flux at the sediment – water interface in the easternmost Baltic Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2019. Vol. 608. P. 33–43.

Conley D. J., Stockenberg A., Carman R., Johnstone R. W., Rahm L., Wulff F. Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Estuar Coast Mar. Sci.* 1997. Vol. 45. P. 591–598.

Eilola K., Meier H. E. M., Almroth E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study. *J. Mar. Syst.* 2009. Vol. 75(1–2). P. 163–184. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.08.009

Gaspar P., Gregoris Y., Lefevre J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson B. G. A time-dependent coupled-basin model of the Baltic Sea, Earth Sciences Centre, Göteborg University C47. 2003. 61 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan, HELCOM Extraordinary Ministerial Meeting. 2007.

HELCOM Thematic assessment of eutrophication 2011–2016. *Baltic Sea Environ. Proceed.* 2018. No. 156.

Hibler W. D., III. Modeling a variable thickness sea ice cover, Monthly Weather Review, 1980. Vol. 108(12). P. 1943–1973. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1943:MAVTSI>2.0.CO;2

Hoikkala L., Kortelainen P., Soinne H., Kuosa H. Dissolved organic matter in the Baltic Sea. *J. Mar. Syst.* 2015. Vol. 142. P. 47–61. doi: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.005/

Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification. *Water (Switzerland)*. 2020. Vol. 12(5). Art. 1307. doi: 10.3390/W12051307

Killworth P. D., Stainforth D., Webb D. J., Paterston S. M. The development of a free-surface Bryan – Cox – Semtner ocean model. *J. Phys. Oceanogr.* 1991. Vol. 21(9). P. 1333–1348.

Lukkari K. Chemical characteristics and behaviour of sediment phosphorus in the northeastern Baltic Sea. *Finn. Inst. Mar. Res. Contrib.* 2008. Vol. 17. P. 1–64.

Meier H. E. M., Edman M. K., Eilola K. J., Placke M., Neumann T., Andersson H. C., Brunnabend S.-E., Dieterich C., Frauen C., Friendland R., Gröger M., Gustafsson B. G., Gustafsson E., Isaev A., Kniebusch M., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S., Savchuk O. P. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations. *Front. Mar. Sci.* 2018. Vol. 5. P. 440. doi: 10.3389/fmars.2018.00440

Neelov I. A., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P., Vankevich R. E. A simulation of

the Gulf of Finland ecosystem with a 3D model. *Proceed. Est. Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2003. Vol. 52. P. 346–359.

Norkko J., Gammal J., Hewitt J. E., Josefson A. B., Carstensen J., Norkko A. Seafloor ecosystem function relationships: in situ patterns of change across gradients of increasing hypoxic stress. *Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 1424–1439.

Pacanowski R. C., Dixon K., Rosati A. The GFDL Modular Ocean Model Users Guide, version 1.0 GFDL Ocean Group, Technical Report No. 2, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, New Jersey, USA, 1993.

Pitkänen H., Lehtoranta J., Räsänen A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ambio*. 2001. Vol. 30. P. 195–201.

Platt T., Harrison W. G., Lewis M. R., Li W. K. W., Sathyendranath R. E., Smith R. E., Vezina A. F. Biological production of the oceans, the case for a consensus. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989. Vol. 52. P. 78–88.

Sarthou G., Timmermans K. R., Blain S., Tréguer P. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: A review. *J. Sea Res.* 2005. Vol. 53. P. 25–42.

Savchuk O., Wulff F. Biogeochemical transformations of nitrogen and phosphorus in the marine environment – Coupling hydrodynamic and biogeochemical processes in models for the Baltic Proper. Stockholm University. Systems ecology contributions. 1996. No. 2. 79 p.

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *J. Mar. Syst.* 2002. Vol. 32. P. 235–280.

Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea. *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629. P. 209–224. doi: 10.1007/s10750-009-9775-z

Savchuk O. P. Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Front. Mar. Sci.* 2018. Vol. 5. P. 95. doi: 10.3389/fmars.2018.00095

The Gulf of Finland assessment. Eds. M. Raateoja, O. Setälä. *Reports of the Finnish Environ. Institute* 27. 2016. 363 p.

Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Modelling dissolved organic nutrients in the Gulf of Finland. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. and Appl. Hydrophysics]. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 90–101.

Zhang J., Hibler W. D., III. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (C4). P. 8691–8702.

Received December 25, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимирова Оксана Михайловна

инженер учебного бюро морских прогнозов, к. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: 3256767@gmail.com
тел.: +79213256767

CONTRIBUTORS:

Vladimirova, Oksana

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: 3256767@gmail.com
tel.: +79213256767

Еремина Татьяна Рэмовна

директор ИГиО, к. ф.-м. н.
Российский государственный гидрометеорологический университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: tanya.er@gmail.com
тел.: +79213256767

Исаев Алексей Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Санкт-Петербургский филиал
1-я линия В. О., 30, Санкт-Петербург, Россия, 119053
эл. почта: isaev1975@gmail.com
тел.: +79213256767

Рябченко Владимир Алексеевич

главный научный сотрудник, д. ф.-м. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Санкт-Петербургский филиал
1-я линия В. О., 30, Санкт-Петербург, Россия, 119053
эл. почта: vla-ryabchenko@yandex.ru
тел.: +79213256767

Савчук Олег Павлович

научный сотрудник, к. г. н.
Балтик Нест институт, Центр Балтийского моря
Стокгольмского университета
Стокгольм, Швеция, SE-10691
эл. почта: olegstobni@gmail.com
тел.: +79213256767

Eremina, Tatiana

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: tanya.er@gmail.com

Isaev, Alexey

St. Petersburg branch of the Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
30 1st Line of Vasilievsky Island, 119053 St. Petersburg, Russia
e-mail: isaev1975@gmail.com
tel.: +79213256767

Ryabchenko, Vladimir

St. Petersburg branch of the Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
30 1st Line of Vasilievsky Island, 119053 St. Petersburg, Russia
e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru
tel.: +79213256767

Savchuk, Oleg

Baltic Nest Institute, Baltic Sea Center, Stockholm University
SE-10691 Stockholm, Sweden
e-mail: olegstobni@gmail.com
tel.: +79213256767

УДК 504

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ФОСФОРНЫХ НАГРУЗОК НА ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин¹, А. В. Кулинкович², А. Ю. Горелышев²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Россия

Проведен анализ трех методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера, расположенные в различных природно-климатических зонах России (метод Фолленвайдера, метод Фолленвайдера и Диллона, метод Лозовика). Установлена статистически значимая зависимость между допустимыми фосфорными нагрузками на десять озер России и площадями их водосборов.

Ключевые слова: озеро; эвтрофирование; допустимые фосфорные нагрузки; ассимиляционная способность; площадь водосбора.

G. T. Frumin, A. V. Kulinkovich, A. Yu. Gorelyshev. METHODS FOR CALCULATING PERMISSIBLE PHOSPHORUS LOADINGS ON LAKES

Three methods for calculating permissible phosphorus loadings on lakes located in different natural and climatic zones of Russia were analyzed (the Vollenweider method, the Vollenweider and Dillon method, the Lozovik method). A statistically significant relationship was found to exist between the permissible phosphorus loadings on ten lakes in Russia and the size of their catchments.

Keywords: lake; eutrophication; permissible phosphorus loading; assimilation capacity; catchment size.

Введение

Среди шести основных проблем лимнологии, сформулированных Международным лимнологическим комитетом (эвтрофирование, флуктуации уровня воды, ацидификация, токсификация, заиливание, разрушение озерных экосистем), центральное место для многих озер мира занимает проблема эвтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990; Науменко, 2007; Фрумин, Гильдеева, 2013]. Если в естественных условиях эвтрофирование ка-

кого-либо озера протекает за время 1000 лет и более, то в результате антропогенного воздействия это может произойти в сто и даже тысячу раз быстрее. Такие крупные водоемы, как Балтийское море, озера Эри, Тахо и Ладжское, перешли из одного трофического статуса в другой всего за 20–25 лет. Данный процесс охватил многие крупнейшие пресноводные озера Европы, США, Канады и Японии.

По образному выражению Ю. Одума, «антропогенное эвтрофирование есть злокачественное увеличение первичной продукции в во-

доеме» [Одум, 1986]. Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит к многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб). Сине-зеленые водоросли в результате своей жизнедеятельности производят сильнейшие токсины (алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др.), которые, попадая в водную толщу, представляют опасность для живых организмов и человека. Токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных. Цианобактерии *Microcystis aeruginosa* выделяют токсины, которые могут повредить печень, кишечный тракт и нервную систему. В мае 2007 г. масштабное цветение *Microcystis* поразило систему водоснабжения города Уси на северном берегу озера Тайху (Китай), оставив более 2 миллионов человек без питьевой воды на неделю.

В условиях антропогенного воздействия степень эвтрофирования водоема в основном определяется поступлением в водоем биогенных веществ, в первую очередь соединений фосфора [Гусаков, 1987]. Для водоемов умеренной зоны решающая роль фосфора, определяющего скорость развития планктонных водорослей, может считаться доказанной [Россолимо, 1977].

Цель исследования – анализ методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на озеро.

Материалы и методы

Исследование зависимости трофического статуса водоема (олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный) от количества поступающего в него фосфора привело к разработке нагрузочной концепции, в основу которой положено представление о наличии количественной связи между величиной поступления (экспорта) этого элемента и реакцией водоема.

Первое приближение величины допустимой фосфорной нагрузки ($L_{\text{доп}}$, г Р/м²·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, было предложено Фолленвайдером [Vollenweider, 1968]:

$$L_{\text{доп}} = 0,025 H^{0,6}, \quad (1)$$

где H – средняя глубина водоема, м.

В работе [Vollenweider, Dillon, 1974] выведено более общее выражение для критической фосфорной нагрузки:

$$L_{\text{кр}} = [P]_{\text{кр}} \cdot H / \tau (1 + \tau^{0,5}),$$

где $[P]_{\text{кр}}$ – критическая концентрация общего фосфора при весеннем перемешивании, мг/л; H – средняя глубина водоема, м; τ – время полного водообмена, год.

Время пребывания воды в озере (время полного водообмена) определяется по выражению [Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990]:

$$\tau = \text{объем озера} : \text{ежегодный отток воды}. \quad (2)$$

Критическую концентрацию фосфора в период весеннего перемешивания принимают равной 20 мкг/л. Сойером и Томасом в качестве граничных концентраций фосфора между олиготрофными и мезотрофными озерами была предложена величина 0,01 мг Р/л [Гусаков, 1987]. В этом случае выражение для допустимой фосфорной нагрузки приводится к следующему виду:

$$L_{\text{доп}} = 0,010 H / \tau (1 + \tau^{0,5}).$$

Как следует из приведенных формул, методика расчета допустимой фосфорной нагрузки Фолленвайдера базируется только на одном морфометрическом показателе (средняя глубина водоема), а методика Фолленвайдера и Диллона – на одном морфометрическом показателе (средняя глубина водоема) и одном гидрологическом показателе (время полного водообмена). Ни одна из этих методик не учитывает ассимиляционную (самоочистительную) способность водоема.

Согласно П. А. Лозовику, за ассимиляционную (или самоочистительную) способность водного объекта следует принимать истинную скорость трансформации вещества в воде [Лозовик и др., 2011]. Допустимая фосфорная нагрузка рассчитывается по следующей формуле:

$$L_{\text{доп}} = As + L,$$

где As – ассимиляция фосфора в водном объекте, L – внешняя нагрузка на водоем.

Соотношение ассимиляции и внешней нагрузки на водный объект рассчитывается по уравнению:

$$As/L = k (1 - R) (\tau + 1),$$

где k – константа скорости трансформации, год⁻¹, R – удерживающая способность в водном объекте.

Удерживающая способность фосфора в водном объекте рассчитывается по формуле:

$$R/1 - R = 0,14\tau + 0,49. \quad (3)$$

Константу скорости трансформации можно рассчитать, используя следующую формулу:

$$k = R/\tau [1 - R \cdot \exp(-1/\tau)]. \quad (4)$$

Расчет ассимиляционной способности водного объекта (A_s):

$$A_s = kC_{\text{оз}} V_{\text{сток}} (\tau + 1),$$

где $C_{\text{оз}}$ – концентрация фосфора, соответствующая олиготрофному статусу, мкг/л; $V_{\text{сток}}$ – сток из озера, км³.

П. А. Лозовиком сформулирован принцип сохранения геохимического класса вод, согласно которому «допустимая антропогенная нагрузка на водоем не должна приводить к $\sqrt{2.5}$ -кратному увеличению концентрации вещества по сравнению с его природным содержанием» [Лозовик, 2006].

Для расчета природного содержания фосфора в водоеме авторами данной статьи использована модель Фолленвайдера (1). К примеру, средняя глубина озера Имандра $H = 16$ м, площадь зеркала $S = 876$ км², объем $V = 11,2$ км³. Допустимая фосфорная нагрузка

$$L_{\text{доп}} = 0,025 H^{0,6} = 0,025 \cdot 160,6 \cdot 876 = 115,6 \text{ т}$$

и природное (фоновое) содержание фосфора

$$C_{\text{прир}} = 115,6/11,2 = 10,3 \text{ мкг/л (табл. 1).}$$

Для расчетов допустимых фосфорных нагрузок на некоторые озера в табл. 2 приведены их морфометрические и гидрологические характеристики.

Таблица 1. Концентрации фосфора в озере, соответствующие олиготрофному трофическому статусу

Table 1. Concentrations of phosphorus in a lake corresponding to the oligotrophic trophic status

Озеро Lake	Концентрация, мкг/л Concentration, µg /L	Озеро Lake	Концентрация, мкг/л Concentration, µg /L
Телецкое Teletskoe	3,1	Нотозеро Notozero	8,2
Онежское Onego	6,3	Чудское Chudskoe	10,0
Ладожское Ladoga	5,1	Селигер Seliger	15,3
Имандра Imandra	10,3	Крошноезеро Kroshnozero	12,5
Топозеро Topozero	8,3	Белое Beloe (White)	14,4

Таблица 2. Морфометрические и гидрологические характеристики озер

Table 2. Morphometric and hydrological characteristics of the lakes

Озеро Lake	Средняя глубина, м Average depth, m	Объем, км ³ Volume, km ³	Площадь, км ² Area, km ²	Сток, км ³ Outflow, km ³
Телецкое Teletskoe	174	40	223	15
Онежское Onego	30	295	9720	18,88
Ладожское Ladoga	51	910	17700	77,69
Имандра Imandra	16	11,2	876	5,17
Топозеро Topozero	15,9	15,6	986	1,201
Нотозеро Notozero	15	11,5	745	7,61
Чудское Chudskoe	7,5	21,8	2613	12,58
Селигер Seliger	5,8	1,22	260	0,63
Крошноезеро Kroshnozero	5,7	0,0505	8,9	0,0574
Белое Beloe (White)	4,1	5,2	1284	5,42

Таблица 3. Период водообмена (τ), удерживающая способность озер (R) и константы скорости трансформации фосфора (k)

Table 3. Period of water exchange (τ), retention capacity of the lakes (R) and rate constants of phosphorus transformation (k)

Озеро Lake	τ , год τ , year	R R	k , год ⁻¹ k , year ⁻¹
Телецкое Teletskoe	2,67	0,46	0,25
Онежское Onego	15,6	0,73	0,15
Ладожское Ladoga	11,7	0,68	0,15
Имандра Imandra	2,17	0,44	0,28
Топозеро Topozero	13	0,70	0,15
Нотозеро Notozero	1,51	0,41	0,34
Чудское Chudskoe	1,73	0,42	0,32
Селигер Seliger	1,94	0,43	0,30
Крошноезеро Kroshnozero	0,88	0,38	0,63
Белое Beloe (White)	0,96	0,38	0,46

По данным, приведенным в табл. 2, и формулам (2), (3) и (4) рассчитаны период водообмена (τ), удерживающая способность фосфора в водном объекте (R) и константы скорости трансформации фосфора (k) (табл. 3).

Результаты и обсуждение

В обобщенном виде результаты расчетов допустимых фосфорных нагрузок на рассмотренные озера приведены в табл. 4.

Таблица 4. Допустимые фосфорные нагрузки на озера, т/год

Table 4. Permissible phosphorus loads on the lakes, tons/year

Озеро Lake	Метод Фолленвайдера Follenweider's method	Метод Фолленвайдера и Диллона Follenweider and Dillon's method	Метод Лозовика Lozovik's method
Телецкое Teletskoe	123	383	128
Онежское Onego	1870	924	736
Ладожское Ladoga	4682	3408	1993
Имандра Imandra	116	160	142
Топозеро Topozero	130	56	55
Нотозеро Notozero	95	165	159
Чудское Chudskoe	219	263	327
Селигер Seliger	18,7	18,6	25,2
Крошноезеро Kroshnozero	0,63	1,1	2,0
Белое Beloe (White)	75	109	196

Таблица 5. Количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на озера и площадями их водосборов

Table 5. Quantitative ratios between the permissible phosphorus loads on the lakes and areas of their catchments

Метод Method	Модель Model	Статистические характеристики Statistical characteristics			
		n	r	$\sigma_{y(x)}$	F_p
Фолленвайдера Follenweider's	$\ln L_{\text{доп}} = -5,17 + 1,07 \ln F$	10	0,926	0,97	48,1
Фолленвайдера и Диллона Follenweider and Dillon's	$\ln L_{\text{доп}} = -4,29 + 0,99 \ln F$	10	0,939	0,80	59,8
Лозовика Lozovik's	$\ln L_{\text{доп}} = -3,09 + 0,86 \ln F$	10	0,943	0,67	64,4

Примечание. n – количество озер, r – коэффициент корреляции, $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка, F_p – расчетное значение критерия Фишера.

Note. n – number of lakes, r – correlation coefficient, $\sigma_{y(x)}$ – standard error, F_p – calculated value of Fisher's criterion.

Учитывая, что озеро и его водосбор – единая природная система [Драбкова, Сорокин, 1979], представлялось целесообразным установить количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на рассматриваемые озера ($L_{\text{доп}}$) и площадями их водосборов (F). Результаты проведенного анализа приведены в табл. 5.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002], приведенные в табл. 5 значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о весьма тесной связи между переменными ($\ln L_{\text{доп}}$ и $\ln F$). Наиболее высокие значения коэффициента корреляции и критерия Фишера и наименьшее значение стандартной ошибки установлено при применении метода Лозовика.

Выводы

1. Достоверность и точность определения величины допустимой фосфорной нагрузки на водный объект, позволяющей ему оставаться в олиготрофном статусе, зависит от метода расчета.
2. Установлены статистически значимые соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на озера и площадями их водосборов.
3. Отличительная особенность метода расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера, разработанного П. А. Лозовиком, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Фолленвайдера и Диллона заключается в том, что он учитывает не только морфологические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную способность в отношении соединений фосфора.

Работа выполнена в РГПУ им. А. И. Герцена в рамках государственного задания при фи-

нансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0016).

Литература

- Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема / Ред. Н. А. Петрова и Б. Л. Гутельмахер. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.
- Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.
- Лозовик П. А. Гидрохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. 2006. 56 с.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Науменко М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2007. 100 с.
- Одум Ю. Экология. Т. 2. М.: Мир, 1986. 376 с.
- Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
- Фрумин Г. Т., Гильдеева И. М. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013. Т. 22, № 4. С. 191–197.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
- Vollenweider R. A., Dillon P. I. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research // Nat. Res. Counc. Canada NRO Assoc. Comm. Sci criteria. Environmental Quality NRCC. 1974. No. 13690. 42 p.
- Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

Поступила в редакцию 25.02.2021

References

- Drabkova V. G., Sorokin I. N.* Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema [A lake and its catchment is a united natural system]. Leningrad: Nauka, 1979. 195 p.
- Frumin G. T., Gil'deeva I. M.* Evtrofirovaniye vo-doemov – global'naya ekologicheskaya problema [Eutrophication of water bodies – a global ecological problem]. *Ekol. khimiya* [Ecol. Chemistry]. 2013. Vol. 22, no. 4. P. 191–197.
- Gusakov B. L.* Kriticheskaya kontsentratsiya fosfora v ozernom pritoke i ee svyaz' s troficheskim urovnem vo-doema [Critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir]. Eds. N. A. Petrov, B. L. Gutelmakher. Leningrad: Nauka, 1987. P. 7–17.
- Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R.* Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and control of man-induced eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.
- Lozovik P. A.* Gidrokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrochemical criteria of the state of surface water in humid zone and its tolerance to anthropogenic impact]: Summary of DSc (Dr. of Chem.) thesis. 2006. 56 p.
- Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V.* Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv

v prirodnykh vodakh [Processes of matter transformation, cycles and formation in natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 21–28.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

Naumenko M. A. Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch. Uchebnoe posobie [Eutrophication of lakes and reservoirs. A study guide]. St. Petersburg: RGGMU, 2007. 100 p.

Odum Yu. Ekologiya [Ecology]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1986. 376 p.

Rossolimo L. L. Izmeneniye limnicheskikh ekosistem pod vozdeistviem antropogennogo faktora [Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors]. Moscow: Nauka, 1977. 144 p.

Vollenweider R. A., Dillon P. I. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. *Nat. Res. Counc. Canada NRO Assoc. Comm. Sci. criteria*. Environmental Quality NRCC. 1974. No. 13690. 42 p.

Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. *Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel.* 1968. Vol. 27. 159 p.

Received February 25, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаб. факультета географии, д. х. н., проф.
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186
эл. почта: gfrumin@mail.ru
тел.: +79111274098

Кулинкович Алексей Викторович

доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций, к. х. н., доцент
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича
пр. Большевиков, 22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232
эл. почта: geochem@mail.ru
тел.: 89111608337

Горелышев Алексей Юрьевич

преподаватель кафедры экологической безопасности телекоммуникаций
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича
пр. Большевиков, 22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232
эл. почта: gau7001@mail.ru
тел.: 89110297031

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru
tel.: +79111274098

Kulinkovich, Alexey

The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications
22 Bolshhevikov Ave., bldg. 1, 193232 St. Petersburg, Russia
e-mail: geochem@mail.ru
tel.: +79111608337

Gorelyshev, Alexey

The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications
22 Bolshhevikov Ave., bldg. 1, 193232 St. Petersburg, Russia
e-mail: gau7001@mail.ru
tel.: +79110297031

ИСТОРИЯ НАУКИ

УДК 061.62:556 (470.22)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОХИМИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ ИВПС КарНЦ РАН

**М. Б. Зобков, А. В. Сабылина, Г. С. Бородулина, А. В. Рыжаков,
Н. Е. Галахина, Н. А. Ефременко, Т. А. Ефремова, М. В. Зобкова**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия*

Представлена история развития лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН начиная с ее образования в Отделе гидрологии и водного хозяйства Карельского филиала АН СССР в 1953 г. до настоящего времени. На протяжении 70 лет в лаборатории выполнялись работы по изучению поверхностных вод суши, морских и подземных вод, атмосферных осадков, донных отложений. Освещены история, важнейшие результаты, основные научные достижения и перспективные направления развития гидрохимических исследований. Особое внимание уделено практическому использованию полученных результатов, а также сотрудникам лаборатории, внесшим значительный вклад в ее развитие.

Ключевые слова: гидрохимия; гидрогеология; история; поверхностные воды; подземные воды; атмосферные осадки; донные отложения; научные результаты; перспективы исследований.

M. B. Zobkov, A. V. Sabylina, G. S. Borodulina, A. V. Ryzhakov, N. E. Galakhina, N. A. Efremenko, T. A. Efremova, M. V. Zobkova. HISTORY OF DEVELOPMENT AND MAIN SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF THE LABORATORY FOR HYDROCHEMISTRY AND HYDROGEOLOGY NWPI KarRC RAS

The article presents the history of development of the Laboratory for Hydrochemistry and Hydrogeology of the Northern Water Problems Institute (Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences) since its establishment within the Department of Hydrology and Water Management at the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences in 1953. For 70 years, the laboratory has been working to study surface waters, sea- and groundwater, atmospheric precipitation, bottom sediments. The history, the most important results, the main scientific achievements, and prospective lines for the development of hydrochemical research are covered. Special attention is given

to the practical use of the results, as well as to the laboratory staff who have significantly contributed to its development.

Key words: hydrochemistry; hydrogeology; history; surface waters; groundwater; precipitation; bottom sediments; scientific results; research prospects.

Введение

Гидрохимические работы в Карелии начались в 1946 г. В 1953 г. в Отделе гидрологии и водного хозяйства Карельского филиала АН СССР (КФ АН СССР) была создана лаборатория гидрохимии, в формировании и оснащении которой большую роль сыграла к. г. н. П. Г. Лобза (1953–1956 гг.) – полярный исследователь, участник экспедиции НИС «Челюскин». С 1956 по 1985 г. лабораторией руководила заслуженный деятель науки КАССР к. б. н. Н. С. Харкевич. В 1985 г. лабораторию возглавил к. х. н. П. А. Лозовик (с 2005 г. – д. х. н. и с 2017 г. заслуженный деятель науки Республики Карелия). В августе 2017 г. исполняющим обязанности заведующего лабораторией гидрохимии и гидрогеологии назначен к. х. н. А. В. Рыжаков, а в 2019 г. заведующим избран по конкурсу к. т. н. М. Б. Зобков.

История развития гидрохимических исследований в Карелии

В истории лаборатории гидрохимии и гидрогеологии можно выделить четыре периода. **В первый** из них (1953–1963 гг.) проведены широкие исследования по оценке качества питьевого водоснабжения городов и населенных пунктов Карелии (Петрозаводска, Кондопоги, Сортавалы и др.), предложены новые места водозаборных сооружений и мероприятия по совершенствованию систем водоочистки (Н. С. Харкевич, Н. П. Маслова). Планомерное изучение химического состава и качества воды озерно-речных систем Карелии, озер Сямозерской группы, оз. Тикшозера с целью рационального использования водных ресурсов в народном хозяйстве позволило создать первые на территории Карелии предприятия по выращиванию товарной рыбы (П. Г. Лобза, Н. С. Харкевич, Н. П. Маслова). По результатам этой работы в 1953 г. защищена кандидатская диссертация к. б. н. Н. С. Харкевич. Чтобы выяснить условия акклиматизации дальневосточной горбуши в Белом море, изучен химический состав вод притоков. Определен химический баланс ионов, биогенных элементов, органических и взвешенных веществ рек Белого моря, что стало основой защищенной в 1960 г. дис-

сертационной работы М. П. Максимовой на соискание ученой степени кандидата химических наук. Итоги исследований отражены в монографиях «Труды Сямозерской комплексной экспедиции» [1956], «Вопросы рыбного хозяйства водоемов Карелии» [1958], «Сямозеро и перспективы его рыбохозяйственного использования» [1977], «Проблемы использования промысловых ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии» [1963].

Второй период приходится на 1963–1980 гг. В 1963 г. при расформировании КФ АН СССР Отдел гидрологии и водного хозяйства и входящая в его состав лаборатория переданы в Северный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации (СевНИИГМ). В связи с этим изменилось и направление гидрохимических исследований водоемов. Интенсивное развитие в Карелии и Архангельской области целлюлозно-бумажной промышленности поставило перед учеными задачу исследовать водоемы – приемники сточных вод в связи с их загрязнением. В результате исследований на Онежском, Ладожском озерах, Выгозерском водохранилище, оз. Суоярви и реках Северная Двина и Вычегда предложены практические рекомендации для проектных организаций по разработке современных систем очистки сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов – Сегежского, Кондопожского, Архангельского, Соломбальского, Котласского, а также Питкярантского ЦБЗ и Суоярвской картонной фабрики (Н. С. Харкевич, М. П. Маслова, М. П. Максимова, Г. Л. Грицевская). Значительный объем гидрохимических исследований выполнен на Выгозерском водохранилище и р. Нижний Выг: в 1969–1975 гг. – до ввода в действие станции биологической очистки (СБО) сточных вод Сегежского ЦБК; в 1976–1982 гг. – во время поэтапного ввода в строй СБО; в 1983–1991 гг. – в период работы СБО в проектном режиме, а с 1992 г. – при резком сокращении объемов производства. В процессе исследований удалось выявить распространение сточных вод в Выгозере (Н. С. Харкевич) и р. Нижний Выг (А. М. Глинский, П. А. Лозовик), оценить эффективность их очистки (В. М. Феоктистов), определить уровень допустимой антропогенной нагрузки на водоем (П. А. Лозовик). В 1978 г. по резуль-

татам проведенных работ защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук С. В. Видягиной. По материалам, полученным в 1963–1991 гг., опубликован ряд статей и сборников: «Кондопожская губа Онежского озера в связи с ее загрязнением промстоками ЦБК» [1975], «Характеристика химического состава и качества воды Выгозерского водохранилища» [1978], «Изменение режима Северного Выгозера и р. Нижний Выг под действием сточных вод Сегежского ЦБК и допустимый объем их сброса» [1986].

В 1970 г. научные силы КФ АН СССР сконцентрировались на комплексном изучении территории, прилегающей к Костомукшскому железорудному месторождению. В этой связи лаборатория была привлечена к исследованию водных ресурсов Костомукшского района. Работы проводились в три этапа: до строительства города и комбината (1970–1976 гг.), в период наращивания мощностей комбината и возведения города (1982–1993 гг.) и регулярных попусков воды из хвостохранилища Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК) (1994–2004 гг.). По результатам первого этапа исследований опубликована монография «Природные воды района Костомукшского железорудного месторождения» [1985] (Н. С. Харкевич, А. В. Сабылина, Е. П. Васильева). На втором этапе исследований установлены изменения в химическом составе озер системы р. Контоikki под влиянием сброса хозяйственно-бытовых сточных вод г. Костомукши и в водоемах р. Кенти, подвергающихся воздействию горно-обогатительного комбината. Разработан режим попусков техногенных вод в систему р. Кенти (В. М. Феоктистов, П. А. Лозовик). Исследования третьего этапа позволили выявить изменение химического состава воды озерных и речных участков системы р. Кенти в результате попусков техногенных вод. Они существенно повлияли на химический состав верхних озер системы (Окуновое, Поппалиярви), что выразилось в увеличении минерализации воды, содержания калия, лития и нитратов. Изменения в химическом составе воды нижних озер (Койвас, Кенто) проявлялись меньше. Материалы наблюдений обобщены в сборнике «Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия» [2001].

Третий этап (1975–1980 гг.) характеризовался выполнением большого объема работ по изучению и оценке состава и качества воды Онежского озера, Ковдозера, Пяозера, Топозера, Выгозерского водохранилища, Сегозера и Ондозера, рек Кемь, Нижний Выг и ряда при-

токов Белого моря, включая р. Онега, в связи с проблемами территориального перераспределения стока. По результатам работ составлен прогноз качества воды Онежского озера, Выгозерского водохранилища, Сегозера, Ондозера, Лувозера на 1990–2000 гг. (Н. С. Харкевич, А. В. Сабылина, М. И. Басов, Г. П. Пирожкова, Б. М. Зобков). Совместно с Институтом водных проблем РАН, Институтом озероведения и Вычислительным информационным центром АН СССР сделан важный вывод о недопустимости использования Онежского озера в качестве трассы перераспределения водных ресурсов. По материалам исследований опубликован ряд статей в центральной печати.

В 1981–1988 гг. исследовались водоемы бассейна р. Шуи. Интенсивное развитие в бассейне реки сельского хозяйства, лесной и сельскохозяйственной мелиорации, лесозаготовок обогатило речные воды биогенными элементами и органическими веществами. В процессе исследований установлены изменения в экосистемах озер, произошедшие за 30 лет. Впервые были получены сведения о биогенных нагрузках, рассчитан баланс химических веществ, оценена роль обменных процессов вода-дно в формировании состава воды, оценена величина антропогенного стока в р. Шуя. Результаты работ обобщены в монографии «Поверхностные воды озерно-речной системы р. Шуи в условиях антропогенного воздействия» [1991] (П. А. Лозовик, А. В. Сабылина, Н. С. Харкевич, С. В. Курапцева (Видягина), М. И. Басов, Н. Н. Мартынова, А. К. Морозов, В. Н. Коваленко).

С 1986 г. в лаборатории проводилось планомерное изучение процессов закисления поверхностных вод Карелии, включающее в себя наблюдения за атмосферными осадками (снегом и дождевыми водами), на всей территории республики. Наблюдения велись в бассейнах рек Шуя, Суна и Выг (1989–1991 гг.), на малых озерах Вендюрско-Вохтозерской группы (1976–1993 гг.) и на озерах, пограничных с Финляндией (1996–1997 гг.). В процессе исследования показано, что атмосферные осадки, выпадающие на территории Карелии, кислые (средняя величина pH – 4,8) и представляют собой потенциальную опасность как источник загрязнения и закисления поверхностных и сточных вод. Выяснено, что местные аэрогенные выбросы крупных предприятий, расположенных в городах Сегежа, Надвоицы, Костомукша, Петрозаводск, Кондопога, приводят к загрязнению относительно небольшого района радиусом 30 км, а определяющую роль в закислении поверхностных вод

Карелии играет трансатлантический перенос атмосферных осадков из Западной Европы (П. А. Лозовик, И. Ю. Потапова, А. В. Сабылина, В. М. Феоктистов, С. В. Басова, И. Ф. Митина, Е. А. Селиванова).

Начиная с 1953 г. постоянным объектом гидрохимических исследований является Онежское озеро в связи с активным его использованием в качестве объекта питьевого водоснабжения, рыбохозяйственного назначения, рекреации, важной транспортной артерии (трасса Беломорско-Балтийского водного пути). За 1960–1990 гг. получены сведения по гидрохимическому режиму озера и отдельных его губ, а также о роли речного стока, атмосферных осадков, сточных вод и внутриводоемных процессов в формировании химического состава воды озера. Г. П. Пирожковой установлено, что в целом состояние водоема соответствует олиготрофному, за исключением акваторий, прилегающих к крупным промышленным центрам. Материалы наблюдений за 1960–1990 гг. обобщены в монографии «Экосистема Онежского озера и тенденция ее изменения» [1990].

Четвертый этап гидрохимических исследований (1991–2005 гг.) совпал с созданием РАН и Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (1991 г.). Три пятилетних цикла (1991–1995, 1996–2000, 2000–2005 гг.) образуют тяжелый период, связанный с кардинальными переменами как в жизни страны, так и в Академии наук. Первые два периода проходили в ИВПС и лаборатории в режиме выживания с выходом к более устойчивому, предсказуемому функционированию, предполагающему дальнейшее развитие. Благодаря сохранению научного коллектива и НИС «Эколог» в 1990–1998 гг. проведены детальные исследования антропогенного воздействия на экосистему Онежского озера от точечных и рассеянных (речных и ливневых) источников загрязнения. Установлено, что сточные воды промышленных центров, расположенных в городах Кондопога и Медвежьегорск, в основном локализуются в заливах, тогда как сточные воды г. Петрозаводска вовлекаются в общезооный круговорот и способны воздействовать на центральную часть озера. Получены новые сведения о химическом балансе минеральных, органических и биогенных веществ в озере, о допустимой биогенной нагрузке на экосистему водоема. В 1990–2000 гг. сотрудники лаборатории принимали участие в выполнении международного проекта ТАСИС-DIMPLAS для координации усилий по управлению ресурсами Онежского и Ладожского озер. Материалы многолетних исследований отражены в моно-

графиях «Состояние водных объектов Республики Карелия» [1997] (П. А. Лозовик, А. В. Сабылина), «Онежское озеро. Экологические проблемы» [1999] (А. В. Сабылина, А. В. Рыжаков). Исследования в северной части Ладожского озера в 1992–2004 гг. показали высокое влияние рассеянных источников загрязнения на качество вод шхерных районов (П. А. Лозовик).

В результате комплексных исследований уникальной экосистемы оз. Паанаярви (бассейн р. Оланга) в 1988–1992 гг. дано заключение о недопустимости строительства на озере гидроаккумулирующей станции, а также обосновано создание национального парка «Паанаярви» (А. К. Морозов). Материалы исследований изложены в сборнике научных статей «Природа национального парка «Паанаярви» [2003].

В 1999–2001 гг. сотрудниками лаборатории проведены гидрохимические исследования водных объектов Заонежского полуострова (П. А. Лозовик, М. И. Басов, М. В. Калмыков, М. Б. Зобков). Основное внимание уделялось водным объектам, расположенным вблизи уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма и Забогинского месторождения шунгитов [Экологические..., 2005]. Изучение химического состава воды 59 водных объектов позволило выявить, что в естественных условиях рудопроявление не сказывается на содержании большинства элементов. В водных объектах, примыкающих к месторождению Средняя Падма, обнаружено превышение фоновых концентраций U, V и некоторых других, но они не превышают ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Исследования донных отложений

Донные отложения (ДО) озер Карелии в лаборатории гидрохимии начали изучать в 1960 г. В 1964–1980 гг. определялись количественные и качественные характеристики органических веществ и биогенных элементов в донных осадках озер, принадлежащих бассейнам рек Шуи, Суны, Кеми, Сумы, Пяльмы, Тубы, Водлы, Ковды, Черной, а также озер Западного и Восточного Заонежья (Е. П. Васильева, Т. В. Поллиева, М. В. Калмыков). Планомерное изучение ДО различных лимнологических областей Карелии позволило определить типы грунтов, вертикальную стратификацию органических веществ и биогенных элементов. Полученные результаты исследований химического состава ДО по 200 озерам отражены в «Каталоге озер Карелии (донные отложения)», составленном Е. П. Васильевой и Ю. К. Поляковым [1992].

С 1979 г. началось изучение обменных процессов на границе вода-дно, имеющих важное значение для оценки внутриводоемной трансформации веществ в разнотипных водоемах Карелии: Выгозерское водохранилище, оз. Суоярви, оз. Исо-Пюхярви, Крошнозеро (М. В. Калмыков, А. М. Глинский, П. А. Лозовик). В дальнейшем исследования обменных процессов на границе вода-дно продолжались на Онежском и Ладожском озерах (Н. А. Белкина).

Постоянным объектом изучения химического состава ДО оставалось Онежское озеро. Исследовались ДО в зонах антропогенного воздействия крупных населенных и промышленных центров (в Кондопожской, Петрозаводской губах и Большой губе Повенецкого залива). Установлены районы озера, подверженные максимальному техногенному загрязнению и эвтрофированию (Е. П. Васильева, Н. А. Белкина, М. В. Калмыков). С 1999 г. большое внимание стало уделяться изучению процессов окислительно-восстановительного диагенеза ДО Онежского и Ладожского озер под воздействием антропогенных факторов. Исследовались особенности формирования и трансформации органического вещества в ДО, отличающихся трофическим статусом, гидрологическими и морфометрическими характеристиками, литологической основой покровных пород (Н. А. Белкина). В 2003 г. по этому направлению исследований Н. А. Белкина защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук «Изменение процессов окислительно-восстановительного диагенеза донных отложений Онежского и Ладожского озер под воздействием антропогенных факторов».

Гидрогеологические исследования

Гидрогеологические исследования в Отделе водных проблем развернулись в полном объеме в 1971 г. вместе с созданием лаборатории гидрогеологии, организатором и руководителем которой стал к. г.-м. н. А. А. Антонов. С 1974 по 1990 г. лабораторию (с 1985 г. – сектор) возглавлял к. г.-м. н. И. К. Поленов. В 1991 г. на базе лаборатории гидрогеологии и группы гидрофизики почв Института биологии была организована лаборатория гидрогеологии и гидрологии водосбора (заведующий д. т. н. И. М. Нестеренко). В 1999 г. создана лаборатория гидрохимии и гидрогеологии под руководством д. х. н. П. А. Лозовика.

На первом этапе существования лаборатории решались отдельные вопросы гидрогео-

логии, в том числе проводилось исследование грунтовых вод, изучение родников и обоснование статуса водных объектов – памятников природы и уникальных территорий (Н. С. Старцев, М. А. Богачев), выявление локальных запасов подземных вод района Костомукшского железорудного месторождения и изучение возможности их использования для водоснабжения [Природные..., 1985].

С 1976 г. ведутся региональные комплексные гидрогеологические и гидрогеохимические исследования по следующим основным направлениям: изучение общих гидрогеологических условий и оценка ресурсов подземных вод; изучение химического состава подземных вод, закономерностей формирования и размещения вод различного химического типа в естественных и нарушенных условиях.

Высокая озерность Карельского региона делает невозможным использование обычных гидрогеологических методов расчета подземного стока. Их усовершенствованием занимались Е. И. Лось и И. К. Поленов. Е. И. Лось считала, что за подземное питание рек Карелии следует принимать минимальный 30-дневный сток зимней межени без введения каких-либо поправок [Лось, 1977]. И. К. Поленовым разработан метод количественной оценки подземного стока с учетом озерного регулирования, на основании которого выполнены расчеты естественных ресурсов подземных вод Карелии [Поленов, Устинов, 1980]. В целом по республике естественные ресурсы подземных вод И. К. Поленовым оценены в количестве 8,5 км³ в год. Доля подземного стока в общем речном составляет 30–60 %. Установлено, что ведущую роль в формировании подземного стока играет строение четвертичного покрова, а высокие значения модулей стока характерны для площадей, сложенных водно-ледниковыми комплексами. Песчаные, главным образом флювиогляциальные, отложения мощностью 10 и более метров являются наиболее перспективными для организации водоснабжения. Эксплуатационные запасы воды в этих комплексах в десятки и сотни раз выше, чем в кристаллических породах [Богачев и др., 1979].

Впервые для региона на основе изучения системы «порода – вода – растворенные газы – живые организмы» начаты региональные гидрогеохимические исследования под научным руководством профессора ЛГУ д. г.-м. н. В. С. Самариной. Были определены параметры вертикальной и горизонтальной гидрогеохимической зональности. В гидрогеологическом разрезе выделены: зона свободного водообмена с двумя подзонами и зона замед-

ленного водообмена. В установленных зонах по-разному проявляется действие основных факторов формирования химического состава подземных вод. В зоне свободного водообмена ведущая роль принадлежит физико-географическим, геоморфологическому и гидродинамическому факторам. Воды зоны замедленного водообмена представляют собой наследие предыдущих геологических периодов, они отражают характер геологических процессов и генезис пород. Эта зональность проявляется и в особенностях изменения водорастворимого комплекса пород с глубиной [Ресурсы..., 1987].

Изучение растворенных газов в подземных водах позволило разделить их на две основные группы: азотно-кислородные и азотные. Азотно-кислородные газы характерны для подземных вод низкой минерализации, приуроченных к верхним частям гидрогеологического разреза. Азотные газы характерны для подземных вод повышенной минерализации зоны замедленного водообмена. Водно-гелиевая съемка, впервые проведенная на Балтийском щите, показала, что щит, как наиболее древняя структура, продолжает развиваться, в его недрах идут процессы, следы которых в виде глубинных газов (водород, гелий, тяжелые углеводороды) устанавливаются в подземных водах верхней части геологического разреза [Богачев, Бородулина, 2008].

Результаты водно-гелиевой съемки придонного слоя воды в Петрозаводской губе Онежского озера явились первым опытом изучения субаквальной разгрузки подземных вод в озера Карелии. В Петрозаводской губе, 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 [Поленов, Иешина, 1981].

В 1980–90-х гг. выполнены первые исследования природных стабильных и радиоактивных изотопов подземных вод (радиоуглерода, трития, дейтерия и др.) с целью изучения скорости водообмена, закономерностей формирования газового и химического состава и оценки возраста подземных вод. Дана характеристика железистых, радоновых и хлоридно-натриевых минеральных вод республики. Выполнен цикл режимных наблюдений за лечебными водами санатория «Марциальные воды» (А. В. Иешина, М. А. Богачев, И. К. Поленов).

Результаты работ этого этапа послужили основой диссертации А. В. Иешиной «Гидрогеохимические условия и формирование химического состава подземных вод юго-восточной части Балтийского щита» (1983), а также отра-

жены в монографии «Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии» [1987], авторами которой были А. В. Иешина, И. К. Поленов, М. А. Богачев, В. С. Теруков, Л. Ф. Логинова, Е. А. Перская, Г. С. Бородулина.

С 1985 г. проводились исследования по теме «Геохимия природных вод Карелии и локальное прогнозирование рудопроявлений гидрогеохимическими методами». Опытные методические работы, выполненные на участках с известными рудопроявлениями в пределах зеленокаменных поясов Карельского геоблока, свидетельствуют о перспективности использования метода для локального прогнозирования рудопроявлений (М. А. Богачев, А. В. Иешина, В. С. Теруков, А. В. Егоров, А. Ю. Эклунд, Г. В. Романова, И. С. Селышева). А. В. Егоров впервые применил физико-химическое моделирование в системе «порода – вода» для прогноза рудопроявлений и влияния степени водообмена на формирование химического состава воды [Егоров, 1990]. Признанием перспективности гидрогеохимического метода явилось участие лаборатории в поисковых работах в пределах Печенгской структуры на Кольском полуострове в 1995–1996 гг. (М. А. Богачев, А. В. Иешина, Г. С. Бородулина, Г. Л. Чесалина).

Результаты гидрогеологических и гидрогеохимических исследований послужили основой для развития дальнейших работ в Карелии, направленных на решение ряда вопросов как теоретического, так и практического значения, связанных с использованием и охраной подземных вод.

В период 1991–2001 гг. на территории Заонежья проведены гидрогеологические исследования, в том числе на месторождениях Зажогинское (шунгит) и Средняя Падма (уран-ванадий), выполнен большой объем опытных откачек из скважин. Впервые выполнено физико-химическое моделирование состава природных вод [Бородулина, Мазухина, 2002]. В сборнике «Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма» [2005] показано, что сложность геологического строения Онежской мульды определяет разнообразие подземных вод по минерализации и химическому составу. В пределах месторождений шунгитосодержащих пород формируются кислые сульфатные воды, на месторождении Средняя Падма – гидрокарбонатные вплоть до высокощелочных. Дальнейшие исследования показали, что основной причиной формирования кислых сульфатных вод является пиритизация высокоуглеродистых палеопротерозойских пород Онежской структуры [Бородулина и др., 2020].

В период совместных работ с УГП «Минерал» (Санкт-Петербург) в 2001 г. в рамках международного проекта «Экогеохимия Баренц-региона» по составлению геохимических атласов Восточного и Центрального Баренц-регионов [Salminen et al., 2004] получен материал по химическому составу малых поверхностных водотоков (водосборы около 100 км²) на территории Карельского региона в период межени, отражающих преимущественно подземный сток четвертичных отложений (М. А. Богачев, Г. Л. Чесалина).

Накопленная информация о подземных водах региона послужила основой для создания «Эколого-гидрогеохимической карты восточной части Балтийского щита» масштаба 1:2500 000 в «Атласе геохимических карт России» [Суриков и др., 2007], гидрогеохимической карты водосборной территории Онежского озера [Онежское..., 2010].

Отмеченная И. К. Поленовым ведущая роль строения четвертичного покрова в формировании подземного стока подтвердилась начатыми в 1996 г. совместно с финскими специалистами исследованиями по оценке запасов подземных вод в песчаных отложениях для водоснабжения населенных пунктов Карелии. Большой объем буровых, опытно-фильтрационных и аналитических работ под руководством М. А. Богачева в различных районах республики позволил выявить закономерности распространения и условия формирования подземных вод в четвертичных отложениях и определить наиболее перспективные участки для организации питьевого водоснабжения населения. Практическим результатом комплекса работ является оценка запасов месторождений подземных вод для водоснабжения г. Суоярви, поселков Калева-ла, Поросозеро, Кааламо, Рускеала и ряда других населенных пунктов Карелии. В результате проведенных исследований введен в эксплуатацию подземный водозабор для централизованного водоснабжения пос. Пряжа (Г. С. Бородулина, И. С. Селышева, Е. А. Перская, Г. Л. Чесалина). Работы по оценке перспективности четвертичных отложений для водоснабжения позволили собрать большой объем гидрогеохимических данных. Результаты этих работ отражены в монографии «Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества» [2006].

Современный этап развития лаборатории

Одно из основных направлений деятельности лаборатории гидрохимии и гидрогеоло-

гии – анализ химического состава различных объектов гидросферы. За время существования лаборатории определение целого ряда компонентов претерпело существенные изменения. Под руководством П. А. Лозовика была проделана большая работа по обеспечению аналитической репрезентативности гидрохимических данных, полученных в разные годы наблюдений, проведено сопоставление всех использованных методов.

Совершенствование аналитических методов, техническое переоснащение, развитие компьютерных технологий позволили расширить перечень исследуемых объектов и изучаемых в них компонентов, а также повысить точность и чувствительность методов обнаружения многих элементов. На современном этапе в лаборатории кроме традиционных методов, таких как гравиметрия и титриметрия, применяются высокочувствительные методы атомной и молекулярной спектроскопии, масс-спектрометрии, хроматографии.

Наряду с общепринятыми в гидрохимии методиками измерений используются модифицированные и новые оригинальные методики определения, разработанные в лаборатории. Предложены новые методы анализа различных химических показателей в природных и загрязненных водах: п-хинонов, фенолов, лигносульфонатов, липидов, углеводов, белков, органического углерода, цветности, хлоридов, щелочности и др. (П. А. Лозовик, Н. Н. Мартынова, А. М. Глинский, А. В. Сабылина, Н. А. Ефременко, Т. А. Ефремова, Ю. Ю. Таланов, В. М. Феоктистов, М. Б. Зобков). Широко используются новые методы определения азотистых соединений (Н. А. Кукконен, О. И. Икко, Т. А. Ефремова), различных форм фосфора (Е. А. Селиванова, И. А. Степанова), сульфатов и органических веществ (Н. Н. Мартынова, И. С. Родькина), тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии и методом масс-спектрометрии (Н. А. Ефременко, А. В. Платонов, Н. В. Кулик), гуминовых и фульвовых кислот и их комплексообразующей способности (А. К. Морозов, М. В. Зобкова).

В 2001 г. лаборатория была аккредитована в Госстандарте России, а с 2009 по 2017 г. – в национальной системе аккредитации. Достоверность и репрезентативность получаемых в лаборатории данных неоднократно подтверждались в рамках межлабораторных сравнительных испытаний и международного проекта ICP-Waters, была получена высокая сходимость результатов анализа, свидетельствующая об их соответствии европейским стандартам.

В 2015 г. в соответствии с решением V Всероссийского симпозиума «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» лабораторией был организован и проведен проект по межлабораторному сличению результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах, участниками которого стали 14 ведущих лабораторий России, Белоруссии и Украины.

Многолетний аналитический опыт работ в области гидрохимии и смежных с ней дисциплин – лимнологии, аналитической химии и экологии позволил подготовить и опубликовать научно-методическое пособие «Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике» [2017] (П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко). Работа получила положительные отзывы специалистов широкого круга.

В настоящее время лаборатория продолжает развитие аналитической базы, одно из направлений которой связано с разработкой методов определения нового загрязнителя окружающей среды – микропластика.

Гидрохимические исследования Белого моря

В 1991 г. возобновились гидрохимические работы на Белом море. А с 2000 г. исследования Белого моря и его водосбора стали комплексными социо-эколого-экономическими. В рамках проекта «Система Белого моря» под руководством академика А. П. Лисицина (ИО РАН) получены количественные и качественные характеристики химического состава воды Белого моря и крупных рек Онега, Кемь, Кереть. Данные исследования проводились в тесном сотрудничестве с Институтом водных проблем РАН (Москва), Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва), Зоологическим институтом РАН (Санкт-Петербург), Институтом полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Бремерхафен, Германия). В рамках исследований осуществлялся мониторинг физических, химических, геологических и биологических процессов в эстуариях карельского побережья Белого моря (реки Кереть и Кемь) [Долотов и др., 2002, 2005; Shevchenko et al., 2005; Шевченко и др., 2010; Политова и др., 2014], выявлено воздействие приливов и отливов на ход эстуарных процессов в зоне влияния этих рек [Долотов и др., 2008]. При этом гидрохимические исследования в рамках совместного проекта включали изучение распределения минерального взвешенного вещества, взвешенных форм тяжелых металлов (Pb,

Cd, Cu, Zn, Fe, Mn), хлорофилла *a* и биогенных элементов (кремния, форм азота и фосфора) в воде (И. Ю. Потапова (Кравченко), А. В. Платонов). Многолетние (2001–2013 гг.) совместные комплексные исследования Белого моря и эстуариев крупных рек (Онега, Кереть, Кемь) имели важное значение для совершенствования системы водопотребления и водопользования региона.

В 2019 г. возобновились гидрохимические работы в рамках комплексных исследований трансформации гидрологических и биогеохимических режимов Белого моря под влиянием приливных процессов на основе методов анализа данных контактных и спутниковых наблюдений, а также математического моделирования. Гидрохимический блок этих исследований включает изучение распределения биогенных элементов в воде Белого моря и устьевых областей рек Кемь [Толстикова и др., 2020] и Нижний Выг в различные сезоны года (отв. Н. Е. Галахина).

Гидрогеологические исследования

Результаты исследований предшествующих лет позволили с учетом впервые установленных региональных фоновых концентраций всего спектра элементов оценить эколого-геохимическое состояние подземных вод. Показано, что преимущественное распространение на территории региона имеют подземные воды природного состояния. Природные гидрогеохимические аномалии Карелии обусловлены не только избытком отдельных элементов (железа, марганца, радона), но и недостатком биологически важных (кальция, магния, йода, фтора, кобальта, хрома и др.), а также их экологически неблагоприятным соотношением. Загрязненные воды имеют локальное распространение. Установлено, что основное антропогенное воздействие на подземные воды связано с хозяйственно-бытовым загрязнением. В 2004 г. по результатам многолетних исследований защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук Г. С. Бородулиной на тему «Эколого-геохимические особенности подземных вод Карелии».

Изучение подземного стока в водоемы продолжено сотрудниками лаборатории под руководством д. г.-м. н. И. С. Зекцера (ИВП, Москва). В книге «Submarine groundwater», изданной в Атланте (США), опубликована глава о прямом подземном стоке в некоторые озера Карелии [Borodulina, Trenin, 2006]. Исследования были продолжены в рамках проектов РФФИ «Зако-

номерности формирования и роль подземного стока в водном и солевом балансе Онежского озера» (рук. Г. С. Бородулина, 2008–2010) и «Изучение геохимических аномалий на границе вода-дно, связанных с субаквальной разгрузкой подземных вод в озера восточного склона Балтийского щита» (рук. Г. С. Бородулина, 2011–2013). В результате дана характеристика гидрогеологических условий формирования подземного стока на водосборе Онежского озера и количественная оценка водного и химического подземного стока, минуя речную сеть, в Онежское озеро и отдельные озера бассейна р. Шуя. Несмотря на то что доля прямого подземного стока в водном балансе озер незначительна, его влияние на химический состав озерной воды более значимо и нередко сравнимо с воздействием, оказываемым поверхностными водами. Наиболее важна роль подземного стока в химическом балансе небольших озер [Лозовик, Бородулина, 2009; Бородулина, 2011]. Впервые исследованы химический, газовый, изотопный состав придонных вод и донных отложений и биологические характеристики в районах субаквальной разгрузки подземных вод в котловину водоемов. Результаты оценки подземного стока в Онежское озеро представлены в монографии «Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» [2015].

Методы оценки подземного стока применены и при изучении палеостока в Онежское озеро разных временных этапов его развития на основе гидрологических характеристик палеоводоема и его водосборного бассейна в рамках программы президиума РАН «Формирование экосистемы Онежского озера в голоцене» 2018–2020 гг. (руководитель д. г. н. Д. А. Субетто).

В 2013–2015 гг. сотрудники лаборатории совместно с Институтами геологии, леса, биологии КарНЦ РАН принимали участие в проекте РФФИ «Разработка основ комплексного геоэкологического мониторинга северных урбанизированных территорий» в части изучения химического состава подземных вод на территории Петрозаводска и разработки концепции геоэкологического мониторинга [Крутских и др., 2016]. В книге «Водные объекты города Петрозаводска» [2013] представлены результаты многолетнего исследования подземных вод на территории города.

Участие в 2012–2014 гг. в проекте РФФИ «Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) на территории Россий-

ской Федерации» (рук. к. г.-м. н. И. В. Токарев, Санкт-Петербургский университет) способствовало продолжению начатых в 2011 г. регулярных наблюдений за изотопным составом атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод. Это направление позволило получить данные о распределении изотопного состава воды в Петрозаводской губе Онежского озера и его притоков и подтвердить характер водообмена губы [Лозовик и др., 2019], а также о распределении изотопов в разрезе и по площади Онежского озера и на его водосборе. Выполнен комплекс работ, направленный на изучение динамики водных масс и условий формирования водного баланса озера. Впервые получены непрерывные ряды наблюдений за изотопным составом атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод региона, позволившие рассчитать средние показатели объектов гидросферы.

Стабильные изотопы воды (дейтерий, кислород-18), являясь маркерами происхождения природных вод, активно используются для палеорекоkonструкций. В рамках проекта РНФ «Палеолимнология Онежского озера: строение, процессы накопления и трансформации донных отложений. От приледникового озера до современных условий» (рук. Д. А. Субетто) установлено, что в Беломорско-Балтийском регионе валдайское похолодание отразилось в формировании в протерозойских породах изотопически легких подземных вод ($\delta^2\text{H} < -100\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} < -14\text{‰}$), для которых в ряде случаев отмечается неравновесное фракционирование изотопов водорода и кислорода, связанное с криогенным метаморфизмом [Tokarev et al., 2019].

Совместные с Чешской геологической службой исследования поведения изотопов хрома в воде рек двух стран, однотипных по характеристикам водосбора, выявили влияние подземного стока на формирование состава воды р. Неглинка [Andronikov et al., 2020].

В 2018–2020 гг. лаборатория принимала участие в проекте Европейского союза по программе «Интерпер Балтийского моря» BSUIN (Baltic Sea Underground Innovation Network), в рамках которого выполнены исследования водных объектов на территории горного парка «Рускеала», организован мониторинг природных и искусственных водоемов на изучаемой территории (Большой каньон, подземное озеро, оз. Монферрана, оз. Светлое, р. Тохмайюки, водозаборная скважина) (Г. С. Бородулина, М. А. Левичев).

Традиционно одним из важных направлений исследований лаборатории является из-

учение минеральных вод Республики Карелия [Бородулина, Игонин, 2012; Бородулина, 2015]. В 2008–2009 гг. выполнена оценка запасов радоновых лечебных минеральных вод в районе г. Костомукши (Кондокское месторождение), определены источники формирования эксплуатационных запасов, изучен химический состав воды и концентрация радона в многолетнем и сезонном разрезе. Воды используются в отделении радонотерапии Костомукшской больницы [Бородулина, Левичев, 2019].

Выполненные лабораторией в 1970-х годах режимные наблюдения на месторождении марциальных вод продолжались, но нерегулярно, и лишь в 2018–2020 гг. при поддержке проекта РФФИ «Закономерности формирования железистых минеральных вод (курорт «Марциальные воды»)» (рук. Г. С. Бородулина) организован ежедневный мониторинг температуры воды и дебита скважин, а также ежемесячные наблюдения за изотопно-химическим составом подземных вод [Бородулина и др., 2019]. Определено, что основными процессами формирования высокожелезистых вод являются окисление сульфидов в шунгитсодержащих комплексах палеопротерозоя и растворение продуктов окисления, имеющих криогенный генезис. Значительные отличия дебита, состава воды четырех близко расположенных скважин и существенный разброс возрастов их вод указывают на смешение современных и реликтовых вод. Установлено, что техногенная деятельность в области питания подземных вод явилась причиной значительных изменений в изотопном составе минеральных вод на фоне относительно стабильного химического состава. Создана концептуальная модель формирования уникального месторождения минеральных железистых вод первого российского курорта «Марциальные воды» на основе режимных наблюдений, изотопно-геохимических данных и палеореконструкций климата [Токарев и др., 2015].

Гидрохимические исследования поверхностных вод

Важной особенностью поверхностных вод Карельского гидрографического района является низкая освоенность территории и незначительное хозяйственное использование водных ресурсов. В совокупности с большим объемом фактической информации это позволило П. А. Лозовику разработать геохимическую классификацию поверхностных вод гумидной зоны на основе теории кислотно-основного равновесия и интегральную систе-

му оценки качества природных незагрязненных вод, а также установить геохимические константы, характеризующие процессы, протекающие в водной среде. Им также были обоснованы критерии оценки допустимой минеральной, биогенной, органической, кислотной и токсической нагрузки на водный объект, на основании которых определены уровни допустимого антропогенного воздействия на водные объекты Карелии. В рамках работы над докторской диссертацией П. А. Лозовик дал теоретическое и экспериментальное обоснование гидрогеохимических критериев состояния и устойчивости водных объектов к антропогенному воздействию. Разработана методология гидрохимических исследований, обеспечивающая получение надежных данных по функционированию водных объектов, формированию химического состава их воды и его трансформации под действием внешних физических факторов и внутриводоемных процессов. Полученные результаты широко использованы для принятия разнообразных решений управленческого характера, в частности по оптимизации сбросов целлюлозно-бумажных предприятий в водные объекты Карелии, попускам воды из хвостохранилища Костомукшского ГОКа и при нормировании антропогенного воздействия на водные объекты. На основе многолетних исследований, проведенных в 1985–2003 гг. на более чем 800 водных объектах Карелии, П. А. Лозовик в 2006 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора химических наук на тему «Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию».

Новые подходы к оценке качества и изучению поверхностных вод, разработанные в лаборатории, были алгоритмизированы и реализованы М. Б. Зобковым в автоматизированной системе «Обработка гидрохимической информации», куда также вошли авторские методы по автоматизированной оценке качества воды с применением функций желательности [Зобков, 2012]. Эти разработки легли в основу диссертации М. Б. Зобкова на соискание ученой степени кандидата технических наук «Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов», которая была защищена в 2012 г.

С 2000-х годов в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС по инициативе и под руководством П. А. Лозовика началась разработка нового физико-химического подхода к изучению внутриводоемных процессов, а после 2005 г. это стало главным научным направлени-

ем лаборатории, проводимым по бюджетным темам, программам ОНЗ РАН и гранту РФФИ. Среди бюджетных тем это в первую очередь «Гидрогеохимические критерии оценки состояния водных объектов гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию» (2014–2016 гг.) и «Научные основы оценки состояния и функционирования водных объектов гумидной зоны по химическим и кинетическим параметрам» (2017–2020 гг.).

В 2000–2005 гг. активизировалось изучение химических процессов, происходящих в водной экосистеме Онежского озера, с целью установления фундаментальных закономерностей в ее функционировании. Исследования, выполненные как в натурных условиях, так и методом лабораторного моделирования, были ориентированы на изучение состава и свойств органических веществ, процессов трансформации минеральных и органических азотсодержащих соединений, кислотно-основного равновесия, а также определялись формы и миграционная способность железа, марганца и других элементов (П. А. Лозовик, А. В. Сабылина, А. В. Рыжак, Н. А. Кукконен, Н. Н. Мартынова, А. К. Морозов, А. В. Платонов).

Важнейшими из внутриводоемных процессов являются трансформация лабильных и загрязняющих веществ, круговорот биогенных элементов и продукционно-деструкционные процессы. Все эти процессы, как было показано П. А. Лозовиком, одинаково хорошо описываются уравнениями классической кинетики химических реакций первого порядка (реже нулевого), что позволило создать общий подход для их описания. Он впервые количественно связал ассимиляцию веществ с константами скоростей их внутриводоемной трансформации и предложил способы определения констант скоростей трансформации веществ расчетным балансовым методом через удерживающую способность и методами лабораторного моделирования, которые дают эти величины непосредственно. Получено кинетическое уравнение, позволяющее рассчитывать константы скорости трансформации веществ по периоду водообмена озера и удерживающей способности [Лозовик и др., 2011]. В результате проведенных исследований установлена ассимиляционная способность Онежского и Ладожского озер для $N_{орг}$, $P_{общ}$, Si и Fe. Среди этих показателей железо общее имеет наибольшую константу скорости трансформации и наименьший период полупревращения, т. е. этот компонент наиболее подвержен изменению в озерных системах. По способности к трансформации кремний занимает промежу-

точное положение между железом и $N_{орг}$ и $P_{общ}$ [Крупнейшие..., 2015]. По данной тематике также выполнялся грант РФФИ «Нормирование антропогенного воздействия на водные объекты Севера с учетом их ассимилирующей способности» (2007–2008 гг.).

Важным практическим применением предложенного показателя ассимиляции является то, что на его основе можно проводить нормирование антропогенной нагрузки на водные объекты. Водные объекты Карелии, испытывающие антропогенное воздействие (озера Ладожское, Онежское, Среднее Куйто, озерно-речная система Кенти-Кенто) вследствие климатических и геохимических особенностей (низкие величины минерализации и концентрации биогенных элементов, высокое содержание ОВ) имеют низкую самоочистительную способность. Данный подход был продемонстрирован П. А. Лозовиком для оценки допустимой фосфорной нагрузки на Ладожское озеро, оз. Крошнозеро, Онежское озеро и его залив – Кондопожскую губу, а также органической нагрузки на оз. Исо-Пюхьярви. Так, для расчета допустимой фосфорной нагрузки принималась сумма природной нагрузки на водоем и ассимиляция $P_{общ}$ в природном состоянии водоема. Выявлено, что состояние Онежского озера полностью соответствует этой нагрузке и по содержанию $P_{общ}$ в современный период оно отвечает верхней границе олиготрофных водоемов. Что касается Ладожского озера, то содержание $P_{общ}$ в нем в современный период соответствует допустимой фосфорной нагрузке. Это является результатом снижения внешней фосфорной нагрузки на озеро в последние годы и, как следствие, уменьшения концентрации $P_{общ}$ в самом озере. Однако в воде оз. Крошнозеро современная концентрация $P_{общ}$ превышает допустимую в 1,3 раза.

Для нормирования антропогенной нагрузки на водные объекты загрязняющими веществами П. А. Лозовик и Н. Е. Галахина предложили методику, учитывающую степень загрязнения этих объектов, оцениваемую по региональному индексу загрязненности воды (РИЗВ), и объема стока из них [Лозовик, Галахина, 2019]. Предложена методика расчета РИЗВ, учитывающего содержание в воде приоритетных загрязнителей и их региональные предельно допустимые концентрации (РПДК) [Лозовик, Платонов, 2005]. С использованием предложенной методики проведено нормирование допустимых антропогенных нагрузок загрязняющими веществами на озерно-речную систему Кенти-Кенто (Республика Карелия) и оз. Имандра (Мурманская область) [Лозовик, Галахина, 2019]. Пока-

зано, что для водоемов системы р. Кенти, подверженных техногенному влиянию АО «Карельский окатыш», показателями, отражающими специфику производства этого предприятия и его воздействия на водную среду, являются K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Li^+ и Ni . В предложенной методике нормирования учитывается как качественная сторона (степень загрязнения воды), так и количественная (объем стока). Работа по этому направлению проводилась также и по программе ОНЗ РАН «Оценка качества вод и нормирование антропогенного воздействия на водные объекты Севера с учетом их ассимиляционной способности» (2009–2011 гг.).

Многолетние гидрохимические исследования водных объектов, подверженных влиянию Костомукшского ГОКа, позволили выявить физико-химические процессы и природно-техногенные факторы, обуславливающие формирование и изменчивость состава воды зоны техногенеза и водоприемников техногенных вод комбината, оценить загрязненность водных объектов, подверженных их влиянию, а также разработать оригинальный подход к нормированию допустимого сброса сточных вод. В 2018 г. по результатам этих исследований Н. Е. Галахиной защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук «Оценка воздействия техногенных вод предприятия железорудной промышленности на систему водных объектов Северной Карелии с учетом природных условий».

В современный период развития важным достижением лаборатории было изучение трансформации соединений азота в природных водах, динамика изменения состава и соотношения которых определяется интенсивностью их биохимической (бактериальной) трансформации в результате протекания внутриводоемного круговорота, представляющего собой циклическую цепь последовательных реакций первого порядка: $N_{орг} \rightarrow NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^- \rightarrow N_{орг}$. А. В. Рыжак, используя методы лабораторного моделирования и анализа натурных данных, впервые определил кинетические характеристики данных реакций (константы скоростей, средние величины скоростей, время полупревращения) [Рыжак и др., 2010]. Также было установлено, что значения констант скоростей трансформации для различных стадий находятся в обратной зависимости от концентраций соединений азота, которые являются исходными для соответствующих стадий цикла.

Известно, что трансформация фосфора связана с превращением органической формы в минеральную и обратно под действием щелочной фосфатазы. А. В. Рыжак и А. В. Са-

былиной определены скорости оборота фосфора, сезонная и температурная зависимости реакции в воде Онежского и Ладожского озер [Рыжак, Сабылина, 2015].

С 2010 г. П. А. Лозовиком и М. В. Зобковой разрабатывался новый подход к оценке продукции и деструкции ОВ в водных объектах, основанный на кинетике БПК и показателях содержания и трансформации автохтонного ОВ [Лозовик и др., 2017]. Некоторые разделы этой работы выполнялись и при поддержке проекта ОНЗ РАН «Кинетические закономерности продукционно-деструкционных процессов в разнотипных водных объектах Карелии» (2012–2014 г.).

Важнейшей характеристикой ОВ природных вод является его качественный и количественный состав. П. А. Лозовиком и М. В. Зобковой разработана новая методика разделения ОВ на аллохтонную и автохтонную составляющие с помощью слабоосновного анионита диэтиламиноэтилцеллюлозы. Установлено, что аллохтонное ОВ превалирует по массе над автохтонным и составляет в среднем 75 % от общего содержания ОВ в водах гумидной зоны. Оно также отличается стабильностью состава и большей устойчивостью к окислению, чем автохтонное ОВ. Для жизнедеятельности гидробионтов важно не общее содержание ОВ, а его присутствие в составе легкоокисляемых фракций (углеводов, липидов, белков и др.). Т. А. Ефремовой установлено, что в автохтонном ОВ доля углеводов может достигать 50 %. Доля белков и липидов в его составе небольшая и составляет 2–5 % [Ефремова, Зобкова, 2019]. П. А. Лозовик и М. В. Зобкова обнаружили важную закономерность в распределении ОВ: содержание автохтонного растворенного ОВ примерно одинаково для всех водных объектов Карелии, тогда как концентрация аллохтонного ОВ весьма изменчива и определяется характером водосборной территории.

Кроме изучения внутриводоемных процессов в лаборатории активно продолжались традиционные гидрохимические исследования в рамках бюджетных тем «Геохимические особенности поверхностных и подземных вод Карелии, обусловленные природными и антропогенными факторами» (2005–2007 гг.) и «Исследование процессов формирования химического состава поверхностных, подземных вод и донных отложений водоемов гумидной зоны» (2008–2010 гг.). Так, были выявлены геохимические особенности поверхностных вод Карелии, обусловленные природными и антропогенными факторами. Обобщены материалы многолетних наблюдений за химическим со-

ставом более 1000 водных объектов. Представлены основные итоги разработки критериев оценки состояния и устойчивости водных объектов гумидной зоны к антропогенному воздействию с учетом процессов формирования химического состава вод. Результаты работы представлены, в частности, в монографии «Озера Карелии» [2013].

Установлены основные геохимические характеристики поверхностных вод гумидной зоны. Большинство объектов (85 %) имеют низкую минерализацию (менее 50 мг/л) с преобладанием вод группы кальция, магния гидрокарбонатного и карбоксилатного классов. Результаты работы представлены в рамках бюджетной темы «Роль водосборной территории и внутриводоемных процессов в формировании химического состава природных вод Карелии» (2011–2013 гг.). Выявлена высокая вариабельность содержания ОВ с низкой долей автохтонного ОВ. Введено новое понятие «гумусность воды», определяемое как среднегеометрическое значение цветности и перманганатной окисляемости. Обнаружена тесная корреляция между косвенными показателями содержания ОВ, гумусностью воды и концентрацией органического углерода [Лозовик и др., 2007]. На примере разнотипных озер Карелии по данным, полученным в 2011–2016 гг., установлено распределение основных форм фосфора (минерального, взвешенного, железосвязанного и органического) в водоемах гумидной зоны. Впервые методом адсорбции гумусовых веществ и их комплексов с металлами на диэтиламиноэтилцеллюлозе определено содержание железосвязанного и органического фосфора. Выявлено, что органический, взвешенный и железосвязанный фосфор находятся в близких количествах, а меньше всего приходится на минеральный, который в первую очередь усваивается гидробионтами. По этой причине биогенное лимитирование в поверхностных водах гумидной зоны обусловлено в основном фосфором минеральным [Рыжаков и др., 2016].

Как и в предыдущие годы, большое внимание в работе лаборатории уделялось прикладным исследованиям. Как правило, эти работы проводились в рамках хозяйственных тем с бюджетными и внебюджетными организациями.

Самым продолжительным из них (более 15 лет) был мониторинг водных объектов на территории Карелии, который проводился согласно приказу Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ № 138 от 12.05.1994 г. Заказчиком этих работ являлось Министерство природных ресурсов

Республики Карелия. Основное внимание уделялось водным объектам, для которых экологические проблемы были особенно актуальны и требовалось принятие управленческих решений по осуществлению водоохранных мероприятий. Их распределяли по группам в зависимости от характера и степени антропогенного воздействия:

1. Водные объекты техногенных районов: Онежское озеро, северная часть Ладожского озера, Выгозерское водохранилище и р. Нижний Выг, водоемы района Костомукши (озерно-речные системы Кенти и Контокки, озера Каменное и Ср. Куйто), Суоярви и Исо-Пюхяярви.

2. Водные объекты сельскохозяйственных районов: Сямозеро, Крошноезеро, Святозеро, Вагатозеро, Пряжинское, Ведлозеро.

3. Фоновый мониторинг: озера Кончезерской группы, нижнего участка р. Суны и Заонежья (Урозеро, Укшезеро, Кончезеро, Пертозеро, Габозеро, Мунозеро и др.).

4. Речные системы: притоки Онежского, Ладожского озер и Белого моря в границах Карелии.

Периодичность наблюдений определялась конкретно для каждого водного объекта. Всего по объектам мониторинга установлен химический состав около 4000 проб воды. Оценка устойчивости и загрязненности вод выполнялась на основе повторяемости случаев и кратности превышения ПДК. В качестве критерия загрязненности водного объекта сточными водами также был использован такой показатель, как кратность разбавления сточных вод в данной точке наблюдения. Была сформирована база данных. Ежегодно по материалам мониторинга формировался отчет, основные сведения включались в Государственный доклад по состоянию окружающей среды Республики Карелия. Исследования показали, что принятые схемы мониторинга и методологические основы оценки качества воды, экологического состояния водоемов и их загрязненности по химическим показателям оказались рациональными и достаточно информативными, что позволило своевременно выявлять и прогнозировать развитие негативных процессов в водных объектах. По результатам мониторинга опубликованы две монографии [Современное..., 1998; Состояние..., 2007].

Сотрудниками лаборатории гидрохимии и гидрогеологии проводились многолетние исследования водных объектов района Костомукши, подверженных техногенному влиянию Костомукшского ГОКа, начавшего свою деятельность в 1982 г. Наблюдения начались в 1970-х годах, еще до ввода в эксплуатацию железо-

рудного месторождения, когда водоемы находились в естественном состоянии, и продолжались до 2015 г. в рамках осуществления мониторинга водных объектов (Н. С. Харкевич, П. А. Лозовик, В. М. Феоктистов, А. В. Морозов, М. В. Калмыков, Н. Е. Галахина) [Харкевич и др., 1980; Феоктистов и др., 1992; Лозовик, Галахина, 2017; Галахина, Лозовик, 2018]. В 2013 г. под руководством М. Б. Зобкова определены морфометрические характеристики хвостохранилища Костомукшского ГОКа в современный период, а в 2015 г. и при участии лаборатории географии и гидрологии (А. Ф. Балаганский) также был проведен мониторинг состояния дна, берегов, изменений морфометрических особенностей, состояния и режима использования водоохраных зон и водохозяйственных систем водных объектов в зонах выпуска техногенных вод Костомукшского ГОКа.

В 2013 г. лаборатория участвовала в проекте «Чистая Ладога» по договору с АНО «Центр энергетической эффективности». Определялась антропогенная нагрузка на северную часть Ладожского озера от точечных и рассеянных источников загрязнения, находящихся на побережье озера и в бассейнах рек, протекающих по территории Олонецкого, Питкярантского, Сортавальского и Лахденпохского муниципальных районов Республики Карелия. Проведенные расчеты позволили установить, что сельскохозяйственные объекты дают наибольший вклад в антропогенную нагрузку на Ладожское озеро по сравнению с точечными источниками загрязнения и форелеводческими хозяйствами. Основное негативное влияние оказывают пахотные земли и животноводческие комплексы, расположенные вблизи русла рек. Показано, что большинство БОС практически не работали, за исключением очистных сооружений городов Лахденпохья и Сортавала. В этой связи требуется в первую очередь строительство очистных сооружений для неочищенных сточных вод, а также повышение эффективности очистки (а именно работы очистных сооружений на уровне проектных показателей) сточных вод г. Олонца, поселков Ильинский, Хелюля, Мийнала, Импилахти.

В 2015 г. по заданию Института озероведения РАН в ИВПС проводилась работа «Анализ водного и биогенного стока в Онежское озеро с водосборной территории», цель которой заключалась в оценке диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработке научно обоснованных предложений по ее снижению. Были учтены точечные источники загрязнения и селитебные территории, расположенные на побережье озера и его водосборе, свалки

бытовых и промышленных отходов, форелевые хозяйства, сельско-, лесохозяйственные и лесопромышленные объекты. Из природных источников диффузной нагрузки рассмотрены речные воды, атмосферные осадки и подземные воды, разгружающиеся непосредственно в озеро. Установлено, что основной вклад в антропогенную нагрузку на озеро дают точечные источники загрязнения (около 63 %). Роль диффузных меньше (около 37 %). Среди рассеянных источников выделяются сельско- и лесохозяйственные объекты (около 56 % от общей диффузной нагрузки), форелеводческие хозяйства (37 % $P_{\text{общ}}$) и селитебные территории (24 % $N_{\text{общ}}$). Вклад свалок значительно меньше (менее 1 % от общей антропогенной нагрузки). Серьезной проблемой также является некорректное функционирование или отсутствие очистных сооружений в большинстве поселений, расположенных на водосборе озера [Лозовик и др., 2016].

Многолетние исследования по содержанию органических и биогенных веществ в озерах Карелии получили высокую оценку научной общественности страны, позволили провести два симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» (1985 и 2012 гг.).

Сотрудники лаборатории принимали активное участие в написании коллективных монографий. Например, в универсальном справочнике «Карелия: энциклопедия» под редакцией А. Ф. Титова [2007, 2009] представлены результаты работ по исследованию химического состава и качества воды в 30 озерно-речных системах Карелии (А. В. Сабылина, П. А. Лозовик). По материалам многолетних исследований химического состава воды Онежского озера и его притоков (1965–2009 гг.) при участии сотрудников лаборатории издан атлас «Онежское озеро» [2010]. В работе показано изменение химического состава воды озера и его притоков в период подъема промышленного и сельскохозяйственного производства в Карелии (1965–1985 гг.) и его спада (1990–2009 гг.).

Кроме того, сотрудники лаборатории принимали активное участие в международных проектах. В рамках международного проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений» исследовался химический состав воды Петрозаводской губы и Центрального плеса озера. Качество воды подо льдом в губе зависит главным образом от объема гумифицированных речных шуйских

вод и антропогенного стока с побережья. Воды Центрального плеса озера характеризуются высоким качеством (цветность 20–22 град., ПО 6,7 мгО/л, $C_{орг}$ 6,1 мг/л). Впервые изучался химический состав в многокомпонентной системе «снег на льду – лед – подледная вода» в Петрозаводской губе и Центральном плесе озера. В результате исследований показано, что среди неорганических форм азотсодержащих соединений в снеге, во льду и подледной воде преобладает нитрат-ион (85 %). Высокие концентрации общего фосфора (до 10 мкг/л) в нижних слоях льда в системе «лед – вода» оказались сравнимы с их содержанием в подледной воде (А. В. Сабылина, О. И. Икко, Т. А. Ефремова).

В рамках международного проекта «Устойчивость под давлением: способность окружающей среды объектов природного и культурного наследия противостоять высокой рекреационной нагрузке» (СУПЕР, 2018–2020 гг.) сотрудниками лаборатории при участии специалистов группы исследования донных отложений оценено загрязнение микропластиком донных осадков особо охраняемых природных территорий: кижских шхер (музей-заповедник «Киж») и оз. Водлозеро (Водлозерский национальный парк).

В проекте «Лососевые рыбы и пресноводная жемчужница – экосистемные услуги и биоразнообразие рек на территории Зеленого пояса Фенноскандии» (SALMUS, 2019–2021 гг.) сотрудниками лаборатории дана гидрохимическая характеристика исследованных водных объектов на основе опубликованных и архивных данных (М. Б. Зобков, Н. Е. Галахина).

В проекте, финансируемом Российским научным фондом, «Распространение микропластика антропогенных полимеров (микропластика) и ассоциированных с ними тяжелых металлов и их соединений в крупных водных объектах суши (на примере Онежского озера)» (2019–2021 гг.) под руководством М. Б. Зобкова сотрудниками лаборатории при участии коллег из группы исследования донных отложений, лаборатории гидробиологии, Института геологии КарНЦ РАН и Морского гидрофизического института (г. Севастополь) проводятся исследования содержания и распространения микропластика в Онежском озере, а также процессов его взаимодействия с тяжелыми металлами и их влияния на водные организмы. В результате двухлетней работы получены новые данные о присутствии микропластиков в воде и донных осадках Онежского озера [Zobkov et al., 2020], определено их морфологическое строение и химический состав полимеров, оценены процессы сорбции-десорбции металлов

с поверхности частиц, процессы поедания частиц микропластика бентосным рачком *Gmelinoides fasciatus* Stebbing.

Большое внимание в лаборатории уделяется формированию баз данных. Информация о многолетних гидрохимических исследованиях водных объектов района Костомукши обобщена в базе данных «Гидрохимические показатели водных объектов района Костомукши Республики Карелия» (Свидетельство о регистрации базы данных RU 2018620628, 12.04.2018). Информация о составе атмосферных осадков, собранная в лаборатории, обобщена в базе данных «Химический состав атмосферных осадков, выпадающих на территории Карелии» (Свидетельство о регистрации базы данных RU 2019621387, 29.07.2019). Зарегистрированы гидрогеологические базы данных: «Гидрогеологические показатели и химический состав воды в скважинах Кондопожского и Медвежьегорского районов Карелии» (Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016621052, 03.08.2016); «Режим скважин на месторождении «Марциальные воды» по результатам наблюдений 2018–2020 гг.» (Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020620452, 11.03.2020). На основе этой цифровой информации в лаборатории ведется ГИС-проект «Подземные воды Карелии», позволяющий на качественно новом уровне решать задачи рационального и экологически безопасного использования подземных вод Карелии. Многолетние исследования позволили собрать информацию о практически всех скважинах, пробуренных на территории Карелии для хозяйственно-питьевого водоснабжения, уточнить координаты и характеристики действующих. Помимо скважин собраны сведения о родниках и колодцах на территории Карелии. К настоящему времени имеется информация о более чем 4000 объектов.

Перспективы дальнейшего развития гидрохимических исследований

Среди приоритетных прикладных задач остаются по-прежнему актуальными вопросы разработки критериев оценки состояния крупнейших озер Европы – Онежского и Ладожского, оценки устойчивости их экосистем к антропогенному воздействию от точечных и рассеянных источников загрязнения. По-прежнему актуальной фундаментальной задачей является изучение процессов трансформации и состава органического вещества гумидной зоны. В связи с общей низкой минерализацией поверхностных вод содержание и состав органиче-

ского вещества в поверхностных водах региона претерпевают наибольшие изменения. Вместе с тем органическое вещество является одним из основных компонентов химического состава воды и неотъемлемой частью водных экосистем, участвует в обеспечении экологического равновесия в водоемах и водотоках: способствует поддержанию жизни, развитию и защите биоты. Гумусовые вещества являются основным компонентом аллохтонного органического вещества и вносят существенный вклад в общее содержание органического вещества поверхностных вод, в некоторых водных объектах их доля может достигать 90 % от общего содержания. Вместе с тем в природных водах широко распространено автохтонное вещество, основными компонентами которого являются углеводы, липиды, белки, нуклеиновые кислоты и другие соединения, образование и трансформация которых напрямую связаны с жизнедеятельностью водных организмов. Природные воды зачастую испытывают антропогенное загрязнение за счет попадания в них стойких трудноокисляемых органических веществ, в этой связи особо актуальными являются знания о процессах трансформации этих веществ. Знание кинетических и термодинамических характеристик их трансформации позволит осуществить нормирование органической и биогенной нагрузки на водоемы, оценить устойчивость водных объектов к антропогенному воздействию и ассимиляционную способность озер в отношении этих веществ. Особо актуальными являются вопросы оценки вклада взвешенных веществ в транспорт, трансформацию и захоронение химических элементов и их соединений, в том числе вклада антропогенных взвесей (включая микропластик) в этот процесс, а также проблемы оценки и нормирования их влияния на водные экосистемы.

Исследование Белого моря имеет важное научное значение в рамках программы изучения арктических морей. Интенсивное освоение водосбора Белого моря способствует формированию зон повышенного антропогенного воздействия, приводящего к существенным изменениям в экосистеме моря. Подробные исследования поступления органического вещества с речным стоком в Белое море проведены только для таких крупных рек, как Северная Двина, Мезень, Онега. До сих пор остается неясным, какова роль в данном процессе притоков карельского побережья. На них приходится 14 % общего стока в Белое море, что составляет 80 % от общего речного стока с территории РК. Гидрохимические исследования рек карельского побережья не проводились с 2014 г.,

в связи с чем возникает необходимость изучить их современное состояние, оценить вынос биогенных элементов и органического вещества с карельской территории и сопоставить полученные данные с известными ранее.

Приоритетным фундаментальным направлением является совершенствование научных подходов для углубленного изучения закономерностей формирования подземных вод и их роли в общих водных ресурсах и водном балансе. При исследовании взаимосвязи подземных и поверхностных вод наиболее эффективным оказывается комплексный подход, включающий изотопно-гидрохимические методы, позволяющий оценить влияние климатических вариаций на водные объекты, оценить условия формирования водоемов и речного стока, в том числе характеристику основных элементов водного баланса: прямого поверхностного стока, поступления снеговых талых и подземных вод, а также выяснить генезис подземных вод региона, поскольку даже пресные подземные воды могут отражать историю развития территории в геологическом прошлом, являясь палеогеографическим архивом. Важными задачами являются региональная оценка, прогноз и картирование естественных ресурсов подземных вод; оценка ресурсов подземных вод и их уязвимости к загрязнению; оценка современного состояния.

Перспективным направлением деятельности является развитие комплексных междисциплинарных исследований с институтами КарНЦ РАН, направленных на решение социальных и экологических проблем Карелии. Также перспективными являются межрегиональные и международные исследования, проводимые путем кооперации с другими академическими и отраслевыми институтами, высшими учебными заведениями и организациями водного профиля как внутри страны, так и за рубежом.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН).

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Богачев М. А., Бородулина Г. С. Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами // Связь поверхностных структур земной

коры с глубинными: 14-я международная конференция. Петрозаводск, 2008. С. 62–63.

Богачев М. А., Иешина А. В., Ильин В. А., Поленов И. К., Соколов С. Я. Подземные воды флювиогляциальных отложений на примере района Талай ламба // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1979. С. 123–136.

Бородулина Г. С. Гидроминеральные ресурсы Карелии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12(8). С. 1462–1465.

Бородулина Г. С. Роль подземного стока в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 108–116.

Бородулина Г. С., Левичев М. А. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75. doi: 10.17580/gzh.2019.03.14

Бородулина Г. С., Мазухина С. И. Физико-химическое моделирование состава природных вод уран-ванадиевого месторождения // Геоэкология, 2002. № 6. С. 445–454.

Бородулина Г. С., Светов С. А., Токарев И. В., Левичев М. А. Роль высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород в формировании состава подземных вод Онежской структуры // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 9. С. 72–87. doi: 10.17076/lim1259

Бородулина Г. С., Токарев И. В., Левичев М. А. Первому русскому курорту – 300 лет. История изучения Марциальных вод // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2019. № 4. С. 76–82. doi: 10.17116/kurort20199604176

Бородулина Г. С., Игонин А. В. Подземные воды Карелии // Горный журнал. 2012. № 5. С. 32–33.

Васильева Е. П., Поляков Ю. К. Каталог озер Карелии. Донные отложения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 122 с.

Водные объекты города Петрозаводска. Учебное пособие / Под ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 31–42. URL: http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/papers/litvinenko_regerand_vodnye-obiekty-2013.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества // Ред. Н. Н. Филатов, А. В. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 263 с.

Вопросы рыбного хозяйства водоемов Карелии. Труды КФ АН СССР. Вып. 13. Петрозаводск, 1958. 200 с.

Галахина Н. Е., Лозовик П. А. Изменение химического состава поверхностных вод в районе Корпангского месторождения железных руд // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 15–30. doi: 10.17076/lim733

Долотов Ю. С., Коваленко В. Н., Лифшиц В. Х., Петров М. П., Платонов А. В., Прего Р., Ратькова Т. Н., Филатов Н. Н., Шевченко В. П. О динамике вод и взвеси в эстуарии р. Кереть (Карельское побережье Белого моря) // Океанология. 2002. Т. 42, № 5. С. 765–774. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29317004> (дата обращения: 20.01.2021).

Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Немова Н. Н., Римский-Корсаков Н. А., Денисенко Н. В., Кутчева И. П., Бояринов П. М., Петров М. П., Лифшиц В. Х., Платонов А. В., Демина Л. Л., Кухарев В. И., Коваленко В. Н., Здорovenнов Р. Э., Ратькова Т. Н., Сергеева О. М., Новигатский А. Н., Паутова Л. А., Филиппева К. В., Нюттик Е.-М., Лоренцен Х. Мониторинг приливно-отливных обстановок в эстуариях карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 670–688. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9175882> (дата обращения: 20.01.2021).

Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Петров М. П., Толстиков А. В., Здорovenнов Р. Э., Платонов А. В., Филиппов А. С., Бушуев К. Л., Кутчева И. П. Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онега в летний период // Океанология. 2008. Т. 48, № 2. С. 276–289. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9934586_88470895.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Егоров А. В. Применение факторного анализа при изучении вертикальной гидрогеохимической зональности подземных вод // Исследования водных ресурсов Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1990. С. 41–43.

Ефремова Т. А., Зобкова М. В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. doi: 10.17076/lim1017

Зобков М. Б. Применение функций желательности для анализа качества воды // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 1. С. 63–70. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17238490_88952920.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Изменение режима Северного Выгозера и р. Нижний Выг под действием сточных вод Сегежского ЦБК и допустимый объем их сброса. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1986. 36 с.

Карелия: энциклопедия: в 3 т. / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: ПетроПресс, 2007. Т. 1: А–Й. 400 с. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bv000070137/details> (дата обращения: 20.01.2021).

Карелия: энциклопедия: в 3 т. / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: ПетроПресс, 2009. Т. 2: К–П. 464 с. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bv000070138/details> (дата обращения: 20.01.2021).

Кондопожская губа Онежского озера в связи с ее загрязнением промстоками ЦБК. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1975. 338 с.

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25893544> (дата обращения: 20.01.2021).

Крутских Н. В., Бородулина Г. С., Казнина Н. М., Батова Ю. В., Рязанцев П. А., Ахметова Г. В., Новиков С. Г., Кравченко И. Ю. Геоэкологические основы организации мониторинга северных урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска)

// Труды КарНЦ РАН. 2016. № 12. С. 52–67. doi: 10.17076/есо361

Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12952143_75266702.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

Лозовик П. А., Платонов А. В. Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. 2005. № 6. С. 527–532. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9149795> (дата обращения: 20.01.2021).

Лозовик П. А., Галахина Н. Е. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в результате техногенного влияния // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 3. С. 21–35. doi: 10.17076/lim309

Лозовик П. А., Галахина Н. Е. Оценка загрязненности водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 6. С. 133–137. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/602/519> (дата обращения: 20.01.2021).

Лозовик П. А., Зобкова М. В., Рыжаков А. В., Зобков М. Б., Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Ефремова Т. В. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный состав // ДАН. 2017. Т. 477, № 6. С. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б., Духовичева М. Б., Осипова Л. А. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9495438_51968819.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28. URL: http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2011/trudy_201104_021-28.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Лось Е. И. Некоторые закономерности формирования подземного стока Карелии (на примере озерно-речной системы Шуи) // Водные ресурсы. 1977. № 1. С. 106–118.

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2010. С. 45–46.

Онежское озеро. Экологические проблемы / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 293 с.

Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии / Науч. ред. Е. П. Васильева, П. А. Лозовик. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. 214 с.

Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Матер. V Всерос. симп. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 465 с. URL: http://elibrary.krc.karelia.ru/353/1/OV_PTZ12.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 165 с.

Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия / Под ред. П. А. Лозовика, В. А. Фрейндлинга. Петрозаводск: Карелия, 1991. 218 с.

Поленов И. К., Иешина А. В. Сток подземных вод в Петрозаводскую губу Онежского озера // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1981. С. 156–159.

Поленов И. К., Устинов Г. Н. Оценка подземного питания рек Карелии методом расчленения их гидрографов // Сборник работ по гидрологии. Л., 1980. № 15. С. 53–61.

Политова Н. В., Филиппов А. С., Володин В. Д., Здоровеннов Р. Э., Зуйкова М. В., Зыкова О. А., Кравчишина М. Д., Потапова И. Ю., Таскаев В. Р., Толстиков А. В., Яковлев А. Е. Комплексные исследования системы Белого моря в рейсе научно-исследовательского судна «Эколог» летом 2013 г. // Океанология. 2014. Т. 54, № 6. С. 855–858. doi: 10.7868/S0030157414060094

Природные воды района Костомукшского железорудного месторождения (Северная Карелия). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. 246 с.

Проблемы использования промысловых ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии. Вып. 1. М.; Л.: Наука, 1963. 250 с.

Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / Отв. ред. В. С. Самарина. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 151 с.

Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Фосфатазная активность и скорость оборота фосфора в воде Ладожского и Онежского озер // Экологическая химия. 2015. Т. 24, вып. 2. С. 111–115.

Рыжаков А. В., Зобкова М. В., Лозовик П. А. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 33–45. doi: 10.17076/lim304

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. URL: <https://www.elibrary.ru/download/>

elibrary_12989298_77768838.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Современное состояние водных объектов Республики Карелия / Под ред. П. А. Лозовика, Т. П. Куликовой, Н. Н. Мартыновой. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.

Состояние водных объектов Республики Карелия / Под ред. П. А. Лозовика, Т. П. Куликовой, Н. Н. Мартыновой. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.

Суриков С. Н., Бородулина Г. С., Иванова Т. Л., Чуйко М. А. Эколого-гидрогеохимическая карта восточной части Балтийского щита, масштаб 1:2500000 // Атлас геохимических карт России. Т. 3 / Ред. Е. А. Басков. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 119 с.

Сямозеро и перспективы его рыбохозяйственного использования. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. 266 с.

Токарев И. В., Бородулина Г. С., Блаженникова И. В., Авраменко И. А. Условия формирования железистых минеральных вод по изотопно-геохимическим данным (курорт «Марциальные воды», Карелия) // Геохимия. 2015. № 1. С. 88–91. doi: 10.7868/S0016752514110090

Толстиков А. В., Галахина Н. Е., Здоровеннов Р. Э. Гидрофизические и гидрохимические исследования в эстуарии реки Кемь в сентябре 2019 года // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 21–31. doi: 10.17076/lim1190

Труды КарНЦ РАН. Вып. 3. Природа национально-го парка «Паанаярви». Петрозаводск, 2003. 182 с.

Труды Сямозерской комплексной экспедиции. Т. 1. Петрозаводск, 1956. 238 с.

Феоктистов В. М., Тимакова Т. М., Калугин А. И. Влияние Костомукшского ГОКа на водную систему Кенти-Кенто // Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1992. С. 63–78.

Характеристика химического состава и качества воды Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы Выгозерского водохранилища и их использование. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1978. 413 с.

Харкевич Н. С., Фрейндлинг В. А., Басов М. И. Современный гидрологический и гидрохимический режим вод бассейна р. Кенти: опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1980. С. 25–28.

Шевченко В. П., Здоровеннов Р. Э., Кравчишина М. Д., Кутчева И. П. Новигатский А. Н., Политова Н. В., Потапова И. Ю., Приходько Д. И., Сласти-

на Ю. Л., Теканова Е. В., Толстиков А. В., Филиппов А. С., Чульцова А. Л., Щербаков К. А. Системные исследования Белого моря в период летней межени 2009 г. в рейсе научно-исследовательского судна «Эколог» // Океанология. 2010. Т. 50, № 4. С. 666–670. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17238156_78010537.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. 110 с.

Экосистема Онежского озера и тенденция ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.

Andronikov A. V., Novak M., Kram P., Sebek O., Andronikova I. E., Efremenko N. A., Borodulina G. S., Subetto D. A., Stepanova M., Antalova E., Levichev M. A., Zobkova M. V., Chesalina G. L. Behaviour of Cr in runoff from two catchments underlain by felsic bedrock // Hydrol. Sci. J. 2020. doi: 10.1080/02626667.2020.1836373

Borodulina G., Trenin V. Groundwater discharge to some lakes of Karelia // Submarine groundwater. Atlanta, USA: CRC Press, 2006. P. 354–360.

Salminen R., Chekushin V., Tenhola M., Bogatyrev I., Glavatskikh S. P., Fedotova E., Gregorauskiene V., Kashulina G., Niskavaara H., Polischuok A., Rissanen K., Selenok L., Tomilina O., Zhdanova L. Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region. Amsterdam: Elsevier B. V., 2004. 548 p.

Shevchenko V. P., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alexeeva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'kova T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia) // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2005. No. 9. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic – White Sea region in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O) // Quater. Intern. 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // J. Environ. Chem. Eng. 2020. Vol. 8, no. 5. P. 104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Поступила в редакцию 03.02.2021

References

Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko (eds.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 270 p.

Bogachev M. A., Borodulina G. S. Svyaz' anomalii geliya v podzemnykh vodakh Karelii s tektonicheskimi zonami [Relationship between helium anomalies in groundwaters of Karelia and tectonic zones]. Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: 14-ya mezhdunar. konf. [Relationship between the surface and deep structures of the Earth's crust: Pro-

ceed. 14th int. conf.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. P. 62–63.

Bogachev M. A., Ieshina A. V., Il'in V. A., Polenov I. K., Sokolov S. Ya. Podzemnye vody flyuvioglyatsial'nykh otlozhenii na primere raiona Talaya lamba [Underground waters of fluvioglacial deposits on the example of the Talaya lamba region]. Vodnye resursy Karelii i ikh ispol'zovanie [Water resources of Karelia and their use]. Petrozavodsk: Kar. fil. AN SSSR, 1979. P. 123–136.

Borodulina G. S. Gidromineral'nye resursy Karelii [Hydromineral resources of Karelia]. Mezhdunarod.

zhurn. priklad. i fund. issled. [Int. J. Appl. Fund. Research]. 2015. No. 12–8. P. 1462–1465.

Borodulina G. S. Rol' podzemnogo stoka v formirovani khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod Karelii [Role of groundwater flow to lakes of the Onega watershed in formation of the chemical composition of lake water]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 108–116.

Borodulina G. S., Levichev M. A. Resursy i geokhimiya podzemnykh vod Karelii [Resources and geochemistry of groundwater in Karelia]. *Gornyi zhurnal* [Ore & Metals]. 2019. No. 3. P. 71–75.

Borodulina G. S., Mazukhina S. I. Fiziko-khimicheskoe modelirovanie sostava prirodnykh vod uran-vanadievogo mestorozhdeniya [Physicochemical modeling of chemical compound of natural waters of uranium-vanadium formation]. *Geoekologiya* [Geoecology]. 2002. No. 6. P. 445–454.

Borodulina G. S., Svetov S. A., Tokarev I. V., Levichev M. A. Rol' vysokouglerodistykh (shungitsoderzhashchikh) porod v formirovani sostava podzemnykh vod Onezhskoi struktury [The role of high-carbon (shungite-bearing) rocks in forming the composition of subsurface water in the Onega structure]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 9. P. 72–87. doi: 10.17076/lim1259

Borodulina G. S., Tokarev I. V., Levichev M. A. Perвому russskomu kurortu – 300 let. Istoriya izucheniya Martsial'nykh vod [300 years of the first Russian resort. History of studies of Marcial Waters]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury* [Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy]. 2019. No. 4. P. 76–82. doi: 10.17116/kurort2019604176

Borodulina G. S., Igonin A. V. Podzemnye vody Karelii [Groundwater of Karelia]. *Gornyi zhurnal* [Ore & Metals]. 2012. No. 5. P. 32–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17831398> (accessed: 20.01.2021).

Dolotov Yu. S., Kovalenko V. N., Lifshits V. Kh., Petrov M. P., Platonov A. V., Filatov N. N., Prego R., Rat'kova T. N., Shevchenko V. P. On the dynamics of water and suspension in the Keret' river estuary (Karelian coast of the white sea). *Oceanology*. 2002. Vol. 42, no. 5. P. 731–740. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13390524> (accessed: 20.01.2021).

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Boyarinov P. M., Petrov M. P., Lifshitz V. Kh., Platonov A. V., Kukharev V. I., Kovalenko V. N., Zdorovenov R. E., Shevchenko V. P., Rimskii-Korsakov N. A., Demina L. L., Rat'kova T. N., Sergeeva O. M., Novigatskii A. N., Pautova L. A., Filipieva K. V., Nemova N. N., Denisenko N. V., Kutcheva I. P., Nyutik E.-M., Lorentsen X. Monitoring tidal conditions in estuaries of the Karelian coast of the white sea. *Water Resources*. 2005. Vol. 32, no. 6. P. 611–628. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13490681> (accessed: 20.01.2021).

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Petrov M. P., Tolstikov A. V., Zdorovenov R. E., Platonov A. V., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Bushuev K. L., Kutcheva I. P., Denisenko N. V., Stein R., Saukel C. Multidisciplinary studies in Onega bay of the White Sea and the estuary of the Onega river during the summer period. *Oceanology*. 2008. Vol. 48, no. 2. P. 255–267. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13577185>

(accessed: 20.01.2021).

Egorov A. B. Primenenie faktornogo analiza pri izuchenii vertikal'noi gidrogeokhimicheskoi zonal'nosti podzemnykh vod [Application of factor analysis for assessment of groundwater vertical hydrogeochemical zonation]. *Issledovaniya vodnykh resursov Karelii* [Exploring water resources in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1990. P. 41–43.

Efremova T. A., Zobkova M. V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera [Concentration, distribution and ratio of the main organic matter components in Lake Onego water]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 9. doi: 10.17076/lim1017

Ekologicheskie problemy osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma [Ecological problems of the development of the Srednyaya Padma formation]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. 110 p.

Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsiya ee izmeneniya [Ecosystem of Lake Onego and tendencies in its alteration]. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p.

Feoktistov V. M., Timakova T. M., Kalugin A. I. Vliyanie Kostomukshskogo GOKa na vodnuyu sistemu Kenti-Kento [The impact of Kostomuksha ore mining site on the Kenti-Kento river system]. *Vodnye resursy Karelii i ekologiya* [Water resources of Karelia and ecology]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1992. P. 63–78.

Galakhina N. E., Lozovik P. A. Izmenenie khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod v raione Korpangskogo mestorozhdeniya zheleznykh rud [Changes in surface water chemical composition at Korpangskoye iron ore deposit]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 9. P. 15–30. doi: 10.17076/lim733

Izmenenie rezhima Severnogo Vygozera i r. Nizhnii Vyg pod deistviem stochnykh vod Segezhsckogo TsBK i dopustimyi ob'em ikh sbrosa [Alteration of Severnoe Vygozero and river Nizhnii Vyg regime under the impact of wastewaters of Segezhsckii pulp and paper mill and allowable volume of their discharge]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1986. 36 p.

Kareliya: entsiklopediya: v 3 t. [Karelia: encyclopedia. Vol. 1]. Ed. A. F. Titov. Petrozavodsk: PetroPress, 2007. Vol. 1: A–I. 400 p. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bv000070137/details> (accessed: 20.01.2021).

Kareliya: entsiklopediya: v 3 t. [Karelia: encyclopedia. Vol. 2]. Ed. A. F. Titov. Petrozavodsk: PetroPress, 2009. Vol. 2: K–P. 464 p. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bv000070138/details> (accessed: 20.01.2021).

Kharakteristika khimicheskogo sostava i kachestva vody Vygozerskogo vodokhranilishcha [Description of chemical compound and water quality of the Vygozero water reservoir]. *Vodnye resursy Vygozerskogo vodokhranilishcha i ikh ispol'zovanie* [Water resources of the Vygozero reservoir and their use]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1978. 413 p.

Kharkevich N. S., Freindling V. A., Basov M. I. Sovremennyy gidrologicheskii i gidrokhimicheskii rezhim vod basseina r. Kenti: oper.-inform. materialy [Current hydrological and hydrochemical regime of waters in the Kenti river basin: operational information]. Petrozavodsk, 1980. P. 25–28.

Kondopozhskaya guba Onezhskogo ozera v svyazi s ee zagryazneniem promstokami TSBK [Kondopoga Bay of Lake Onega and its pollution by industrial waste from the Kondopoga Pulp and Paper Mill]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1975. 338 p.

Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lakes-reservoirs of the north-west European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25893544> (accessed: 20.01.2021).

Krutsikh N. V., Borodulina G. S., Kaznina N. M., Batova Yu. V., Ryazantsev P. A., Akhmetova G. V., Novikov S. G., Kravchenko I. Yu. Geoekologicheskie osnovy organizatsii monitoringa severnykh urbanizirovannykh territorii (na primere g. Petrozavodsk) [Geoecological basis for setting up the monitoring of urbanized areas in the north (the example of Petrozavodsk)]. *Trudy KarNTs RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 12. P. 52–67. doi: 10.17076/eco361

Lozovik P. A., Borodulina G. S. Nitrogen compounds in the surface and subsurface waters of Karelia. *Water Resources*. 2009. Vol. 36, no. 6. C. 672–682. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12952143_75266702.pdf (accessed: 20.01.2021).

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnykh nablyudenii [Nutrient load on lake Onego according to field data]. *Trudy KarNTs RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 5. P. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Water Resources*. 2019. Vol. 46, no. 1. P. 94–102. doi: 10.1134/S0097807818050123

Lozovik P. A., Platonov A. V. Opredelenie regional'nykh predel'no dopustimyykh kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv na primere Karel'skogo gidrograficheskogo raiona [Determination of regional maximum permissible concentrations of pollutants by the example of Karelia hydrographic region]. *Geoekologiya* [Geoecology]. 2005. No. 6. P. 527–532. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9149795> (accessed: 20.01.2021).

Lozovik P. A., Galakhina N. E. Izmenenie khimicheskogo sostava vody sistemy r. Kenti v rezul'tate tekhnogennogo vliyaniya [Changes in the chemical composition of the Kenti river system water under human impact]. *Trudy KarNTs RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 3. P. 21–35. doi: 10.17076/lim309

Lozovik P. A., Galakhina N. E. Otsenka zagryaznennosti vodnykh ob'ektov i normirovanie dopustimoi antropogennoi nagruzki na nikh [Evaluation of the degree of water bodies pollution and normalization of the permissible anthropogenic load on them]. *Vestnik Moskovskogo univ. Ser. 5: Geografiya* [Bull. Moscow St. Univ. Ser. 5, Geography]. 2019. No. 6. P. 133–137. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/602/519> (accessed: 20.01.2021).

Lozovik P. A., Zobkova M. V., Ryzhakov A. V., Zobkov M. B., Efremova T. A., Sabylina A. V., Efremova T. V. Allokhthonnoe i avtokhtonnoe organicheskoe veshchestvo prirodnnykh vod: kineticheskie i termodinamicheskie zakonomernosti transformatsii, kolichestvennyi i kachestvennyi sostavy [Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic laws of transformation, quantitative and qualitative composition]. *DAN* [Dokl. Acad. Sci.]. 2017. Vol. 477, no. 6. P. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dukhovicheva T. A., Osipova L. A. Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters in Karelia. *Water Resources*. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 204–216. doi: 10.1134/S009780780702011X

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protssesy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnnykh vodakh [Processes of matter transformation, cycles and formation in natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 21–28. URL: http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2011/trudy_201104_021-28.pdf (accessed: 20.01.2021).

Los' E. I. Nekotorye zakonomernosti formirovaniya podzemnogo stoka Karelii (na primere ozerno-rechnoi sistemy Shui) [Some regularities in groundwater discharge in Karelia (Shuya lake-river system as an example)]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1977. No. 1. P. 106–118.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia: a catalogue]. Ed. N. N. Filatova, V. I. Kukhareva. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onego. Atlas]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 45–46.

Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy [Lake Onego. Environmental problem]. Eds. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. 293 p.

Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy v vodakh Karelii [Organic matter and nutrients in waters of Karelia]. Ed. E. P. Vasil'eva, P. A. Lozovik. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1985. 214 p.

Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Mater. V Vseros. simp. s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sent. 2012 g.) [Organic matter and nutrients in surface and marine waters. Proceed. V symp. with int. part.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. 465 p. URL: http://elibrary.krc.karelia.ru/353/1/OV_PTZ12.pdf (accessed: 20.01.2021).

Poverkhnostnye vody Kaleval'skogo raiona i territorii Kostomukshi v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya [Inland waters of the Kalevala Region and area of Kostomuksha under the anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. 165 p.

Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya [Surface waters of the Shuya river-lake system under the anthropogenic impact]. Eds. P. A. Lozovik, V. A. Freindling. Petrozavodsk: Kareliya, 1991. 218 p.

Polenov I. K., Ieshina A. V. Stok podzemnykh vod v Petrozavodskuyu gubu Onezhskogo ozera [Ground water discharge in Petrozavodsk bay of Lake Onego].

Petrozavodskaya guba Onezhskogo ozera [Petrozavodsk bay of Lake Onego]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1981. P. 156–159.

Polenov I. K., Ustinov G. N. Otsenka podzemnogo pitaniya rek Karelii metodom raschleneniya ikh gidrografov [Assessment of groundwater discharge of rivers of Karelia by hydrograph separation]. *Sbornik rabot po gidrologii* [Collection of works on hydrology]. Leningrad, 1980. No. 15. P. 53–61.

Politova N. V., Filippov A. S., Zuikova M. V., Zykova O. A., Kravchishina M. D., Taskaev V. R., Volodin V. D., Zdorovenov R. E., Potapova I. Yu., Tolstikov A. V., Yakovlev A. E. Multidisciplinary investigations of the White Sea system in the expedition of the r/v Ekolog in the summer of 2013. *Oceanology*. 2014. Vol. 54, no. 6. P. 808–811. doi: 10.1134/S0001437014060095

Prirodnye vody raiona Kostomukshskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya (Severnaya Kareliya) [Natural waters of Kostomuksha ore formation (northern Karelia)]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1985. 246 p.

Problemy ispol'zovaniya promyslovyykh resursov Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Karelii [Challenges in resource use of the White Sea and inland waters of Karelia]. Iss. 1. Moscow; Leningrad: Nauka, 1963. 250 p.

Resursy i geokhimiya podzemnykh vod Karelii [Resources and geochemistry of groundwater in Karelia]. Ed. V. S. Samarin. Petrozavodsk, 1987. 151 p.

Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Fosfataznaya aktivnost' i skorost' oborota fosfora v vode Ladozhskogo i Onezhskogo ozer [Phosphatase activity and rate of phosphorus turnover in water of Lakes Ladoga and Onego]. *Ekol. khimiya* [Environ. Chemistry]. 2015. Vol. 24, iss. 2. P. 111–115.

Ryzhakov A. V., Zobkova M. V., Lozovik P. A. Oso-bennosti soderzhaniya i raspredeleniya form fosfora v vodoemakh gumidnoi zony [Patterns in the concentration and distribution of phosphorus forms in water bodies of the humid zone]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 33–45. doi: 10.17076/lim304

Ryzhakov A. V., Kukkonen N. A., Lozovik P. A. Determination of the rate of ammonification and nitrification in natural water by kinetic method. *Water Resources*. 2010. Vol. 37, no. 1. P. 70–74. doi: 10.1134/S0097807810010069

Shevchenko V. P., Ananyev R. A., Gusakova A. I., Dmitrevskii N. N., Kravchishina M. D., Mishin A. V., Politova N. V., Filippov A. S., Potakhin M. S., Tolstikov A. V., Chul'tsova A. L. Studies of the white sea system from onboard the r/v ecology in July 2010. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 6. P. 1074–1077. doi: 10.1134/S0001437011060154

Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya [Current state of water bodies of Karelia]. Eds. P. A. Lozovik, T. P. Kulikova, N. N. Martynova. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998. 188 p.

Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya [The state of inland waters of Karelia]. Eds. P. A. Lozovik, T. P. Kulikova, N. N. Martynova. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 210 p.

Surikov S. N., Borodulina G. S., Ivanova T. L., Chuiko M. A. Ekologo-gidrogeokhimicheskaya karta vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita, masshtab

1:2500000 [Ecological and geochemical map of eastern part of Baltic crystalline shield. Scale 1:2500000]. *Atlas geokhimicheskikh kart Rossii. T. 3* [Geochemical maps of Russia. Atlas. Vol. 3]. Ed. E. A. Baskov. St. Petersburg: VSEGEI, 2007. 119 p.

Syamozero i perspektivy ego rybokhozyaistvennogo ispol'zovaniya [Syamozero and perspectives of its use for fishery]. Petrozavodsk: AN SSSR, 1977. 266 p.

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Blazhennikova I. V., Avramenko I. A. Usloviya formirovaniya zhelezistykh mineral'nykh vod po izotopno-geokhimicheskim dannym (kurort "Martsial'nye Vody", Kareliya) [Conditions of formation of ferriferous mineral waters based on isotopic and geochemical data (Marcial waters resort, Karelia)]. *Geokhimiya* [Geochemistry]. 2015. No. 1. P. 88–91. doi: 10.7868/S0016752514110090

Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Zdorovenov R. E. Gidrofizicheskie i gidrokhimicheskie issledovaniya v estuarii reki Kem' v sentyabre 2019 goda [Hydrophysical and hydrochemical studies in the Kem river estuary in September 2019]. *Trudy KarNTs RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 4. P. 21–31. doi: 10.17076/lim1190

Trudy KarNTs RAS. Vyp. 3. Priroda natsional'nogo parka "Paanayarvi" [Transactions of KarRC RAS. Nature of the Paanayarvi National Park]. Petrozavodsk, 2003. 182 p.

Trudy Syamozerskoi kompleksnoi ekspeditsii [Materials of the interdisciplinary Syamozero expedition]. Vol. 1. Petrozavodsk, 1956. 238 p.

Vasil'eva E. P., Polyakov Yu. K. Katalog ozer Karelii. Donnye otlozheniya [Lakes of Karelia: a catalogue. Bottom deposits]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1992. 122 p.

Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk. Uchebnoe posobie [Waterbodies of Petrozavodsk. A study guide]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Regerand. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 31–42. URL: http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/papers/litvinenko_regerand_vodnye-obiekty-2013.pdf (accessed: 20.01.2021).

Vodnye resursy Respubliki Kareliya i puti ikh ispol'zovaniya dlya pit'evogo vodosnabzheniya. Opyt karel'sko-finlyandskogo sotrudnichestva [Water resources of republic of Karelia and their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish cooperation]. Eds. N. N. Filatov, A. V. Litvinenko, A. Syarkioya, R. Porttikivi, T. I. Regerand. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. 263 p. URL: http://elibrary.krc.karelia.ru/325/1/water_resource_RK.pdf (accessed: 20.01.2021).

Voprosy rybnogo khozyaistva vodoemov Karelii. Trudy KF AN SSSR. Vyp. 13. [Issues of fishery in the water bodies of Karelia. Transactions of Karelian Branch of AS USSR. Vol. 13]. Petrozavodsk, 1958. 200 p.

Zobkov M. B. Application of desirability functions for water quality analysis. *Water Resources*. 2012. Vol. 39, no. 1. P. 90–97. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17970979> (accessed: 20.01.2021).

Andronikov A. V., Novak M., Kram P., Sebek O., Andronikova I. E., Efremenko N. A., Borodulina G. S., Subetto D. A., Stepanova M., Antalova E., Levichev M. A., Zobkova M. V., Chesalina G. L. Behaviour of Cr in runoff from two catchments underlain by felsic bedrock. *Hydrol. Sci. J.* 2020. doi: 10.1080/02626667.2020.1836373

Borodulina G., Trenin V. Groundwater discharge to some lakes of Karelia. *Submarine groundwater*. Atlanta, USA: CRC Press, 2006. P. 354–360.

Salminen R., Chekushin V., Tenhola M., Bogatyrev I., Glavatskikh S. P., Fedotova E., Gregorauskiene V., Kashulina G., Niskavaara H., Polischuok A., Rissanen K., Selenok L., Tomilina O., Zhdanova L. Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region. Amsterdam: Elsevier B. V., 2004. 548 p.

Shevchenko V. P., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alexe-eva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'ko-va T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2005. No. 9. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic – White Sea region in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O). *Quater. Intern.* 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. Vol. 8, no. 5. P. 104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Received February 03, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зобков Михаил Борисович

руководитель лаб. гидрохимии и гидрогеологии, к. т. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: duet@onego.ru

Сабылина Альбина Васильевна

старший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. х. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: vos-olga-zenia@yandex.ru

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. г.-м. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru

Рыжаков Александр Вадимович

старший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. х. н., доцент
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Галахина Наталия Евгеньевна

научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. х. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: kulakovanata@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Zobkov, Mikhail

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: duet@onego.ru

Sabylina, Albina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru

Ryzhakov, Alexander

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

Galakhina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kulakovanata@mail.ru

Ефременко Наталья Анатольевна

главный химик лаб. гидрохимии и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremna@mail.ru

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Зобкова Мария Валентиновна

младший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: rincalika21@yandex.ru

Efremenko, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremna@mail.ru

Efremova, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Zobkova, Maria

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: rincalika21@yandex.ru

ХРОНИКА

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СОХРАНЕНИЯ
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ»,
посвященная 30-летию ИВПС КарНЦ
и 75-летию Карельского научного центра РАН
(Петрозаводск, 19 марта 2021 г.)**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) организовал и 19 марта 2021 г. провел всероссийскую научную конференцию, посвященную 30-летию ИВПС КарНЦ и 75-летию Карельского научного центра РАН, – «Фундаментальные проблемы и пути решения практических задач сохранения и рационального использования водных объектов Северо-Запада России».

Историческая справка: 31 января 1946 г. была создана Карело-Финская база Академии наук СССР, включавшая сектор гидрологии и водного хозяйства, который позже был преобразован в Отдел водных проблем Карельского филиала АН СССР. 14 мая 1991 года на базе Отдела водных проблем был создан Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

Конференция, посвященная указанным юбилейным датам, проводилась в очно-заочном режиме из-за продолжающихся ограничений, связанных с пандемией коронавируса COVID-19. Приобретенный в 2020 г. опыт организаторов и участников позволил организовать за один день работы конференции кроме общей пленарной секции одновременную ра-

боту пяти тематических секций, а также секции стендовых докладов с общим количеством зарегистрированных участников на сайте конференции около 100 человек.

В работе конференции 19.03.2021 г. в очно-дистанционном режиме приняли участие научные сотрудники из 29 организаций, включая научные институты и высшие учебные заведения Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Севастополя, Калининграда, Новосибирска, Казани, Апатитов, Тольятти, Петрозаводска и даже Франции. На конференции были представлены доклады по следующим основным направлениям:

- Роль гидрофизических процессов в функционировании водных экосистем. Природные тренды и передовые технологии исследований.
- Донные отложения озер – природные архивы локальных, региональных и глобальных изменений географической оболочки Земли.
- Биоразнообразие и трофические взаимодействия в водных экосистемах в условиях климатических изменений и влияния антропогенных факторов.

- Реакция водных объектов на изменение климата.
- Проблема рационального природопользования, охраны и управления водными ресурсами.
- Моделирование гидрологических и биогеохимических процессов.
- Гидрохимические исследования морских и поверхностных вод.

Пленарная сессия проходила в конференц-зале КарНЦ РАН в г. Петрозаводске, где непосредственно заседали около 40 участников, в том числе и из других городов, а остальные принимали участие в удаленном формате с использованием платформы ZOOM. Стендовые доклады были заранее размещены на сайте ИВПС КарНЦ РАН в разделе конференции в специальном подразделе «Дистанционная постерная сессия» (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3717>) для более детального знакомства с работами, а также с возможностью размещения комментариев и вопросов автору и его ответов.

С приветствием к участникам конференции обратился председатель оргкомитета чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов. С поздравлениями по случаю юбилея ИВПС КарНЦ РАН выступили: председатель КарНЦ РАН чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет, директор ИВП РАН член-корр. РАН А. Н. Гельфан, директор Института проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан д. х. н. Р. Р. Шагидуллин, заместитель директора ИНОЗ РАН д. ф.-м. н. С. А. Кондратьев, профессор физического факультета МГУ д. ф.-м. н. К. В. Показеев и заместитель директора ИО РАН к. г.-м. н. В. П. Шевченко.

За один день конференции на пленарном и пяти секционных заседаниях, а также стендовой секции было заслушано 57 докладов: 8 пленарных, 41 секционный, 8 стендовых.

Пленарную сессию (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3721>) открывал коллективный доклад авторов ИВПС КарНЦ РАН, в котором Н. Н. Филатов представил основные сведения об истории создания института и результаты исследований ИВПС КарНЦ РАН, полученные за последние 30 лет. В докладе показано, что главная цель деятельности ИВПС КарНЦ РАН заключается в проведении фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области гидрологии и смежных естественных дисциплин и прикладных исследований, связанных с изучением, рациональным использованием и охраной водных ресурсов. Были представлены исследования, которые проводились на озерах, в том числе Ладожском и Онежском, Белом море, много-

численных озерно-речных системах, и результаты работ по изучению подземных вод севера европейской части России.

В докладе д. ф.-м. н. С. А. Кондратьева с соавторами (ИНОЗ РАН) представлены оригинальные разработки системы моделей для оценки и прогноза тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем». Особое внимание уделено опыту создания систем моделей для водосборов Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, решения проблем оценки нагрузки на Балтийское море, а также задач по проекту «Оздоровление Волги». Авторы не стремились к разработке универсальных моделей, но зато модели были корректно отлажены, верифицированы для изучения конкретных объектов.

Доклад старшего научного сотрудника ИВПС КарНЦ РАН к. х. н. А. В. Сабылиной был посвящен истории деятельности одной из ведущих лабораторий института – лаборатории гидрохимии и гидрогеологии. В ее докладе прослежены этапы становления лаборатории, а показанные достижения и результаты свидетельствуют о том, что эта лаборатория стала одной из сильнейших в России в области гидрохимии.

Пленарный доклад чл.-корр. РАН А. Н. Гельфана с соавторами из ИВП РАН и МГУ им. Ломоносова посвящался проблемам моделирования гидрологических последствий изменения климата на примере рек Северо-Запада России. В нем обсуждаются ансамблевые подходы к изучению изменений климата, наиболее подробно – результаты с использованием модели ECOMAG, разработанной в ИВП РАН. Представлены результаты по рекам Северная Двина, Печора, Онега и Мезень, изучен приток вод в Белое море. Региональные гидрологические модели рассмотрены как инструмент поддержки принятия управленческих решений.

Доклад проф., д. х. н. Г. Т. Фрумина (РГПУ им. А. И. Герцена) «Методы расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера» подготовлен совместно с коллегами из СПбГУ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Работа посвящена в основном анализу существующих подходов к определению так называемых допустимой и критической антропогенных нагрузок. Авторы проанализировали три подхода к оценке допустимой антропогенной нагрузки на примере пяти озер: Телецкое, Имандра, Селигер, Чудское и Тайху (Китай).

В докладе «Основные экологические проблемы Ладожского озера и водоемов его бассейна» д. б. н. Е. А. Курашов с коллегами из ИНОЗ РАН представили результаты многолетних комплексных исследований основных

биологических сообществ Ладожского озера, что позволило оценить современное состояние водоема и описать возможные изменения в начале XXI века. В настоящее время трофический статус центральной части акватории Ладожского озера оценивается как слабomezотрофный, северной – как олиготрофный, западной – как мезотрофный, южной части (Свирская и Волховская губы) – как слабозвтрофный. Обсуждается проблема цианобактериального токсического загрязнения водоемов бассейна Ладожского озера, а также новых видов загрязнения озер – микропластиком и наночастицами.

В докладе д. ф.-м. н. Е. В. Веницианова (ИВП РАН, Москва) «Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки» рассмотрены проблемы обеспечения устойчивого водоснабжения крупных промышленных предприятий, расположенных в районе г. Березники на р. Кама, где имеется проблемная территория – шламохранилище с высоким содержанием хлоридов. Представлен опыт использования 2- и 3-мерных математических моделей пакета ANSYS Fluent для предупреждения возможных аварийных выбросов хлоридов, которые могут повлиять на качество воды водозабора, и оценки пространства загрязненных вод.

В докладе к. г.-м. н. А. Н. Новигатского с коллегами из ИО РАН (Москва) «Беломорский седиментогенез: вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и абсолютные массы донных осадков» представлен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. На основе многолетних исследований моря удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях субарктической и арктической зон. Изучена месячная, сезонная, многолетняя динамика основных компонентов Белого моря. Представлена морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок.

Далее работа конференции осуществлялась по пяти секциям: «География и гидрология», «Гидрофизика», «Гидробиология», «Гидрохимия», «Развитие Онежского озера и его бассейна в поздне- и послеледниковое время». На секционных заседаниях, прошедших в гибридном формате, заслушано 40 сообщений

по современной проблематике изучения водных ресурсов Евразийского региона и трансграничных водных объектов России.

В рамках секции «Гидрофизика» прозвучало пять научных сообщений, из них три доклада сотрудников ИВПС КарНЦ РАН и два – представителей института LEGOS, Университет Тулузы, Франция, и СПбПУ, Россия (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3725>).

Участники обсудили ряд актуальных проблем современной лимнологии, включая методологию измерений и обработки данных, методы математического моделирования гидрофизических процессов и явлений, влияние изменений климата на водные объекты суши. Основное внимание было сосредоточено на периоде ледостава и влиянии климатических и погодных условий на гидрофизические процессы как в больших озерах (Байкал и Хубсугул), так и в малых водоемах. В частности, приведены результаты исследования такого интереснейшего явления, как круги на льду больших озер, которые появляются в результате формирования подо льдом крупных вихрей. Рассмотрен метод расчета облученности поверхности озер, учитывающий влияние облачности разных ярусов и позволяющий получать более точные оценки по сравнению с существующими эмпирическими формулами. Обсуждались результаты расчета турбулентной рэлей-бенаровской конвекции в цилиндрической емкости методом прямого численного моделирования и с применением модели рейнольдсовых напряжений.

На секции «География и гидрология» было представлено восемь докладов – по одному докладу ИВПС КарНЦ РАН и ИПМИ КарНЦ РАН и шесть докладов сделаны дистанционно представителями РГГМУ, университета ИТМО, ИНОЗ СПб ФИЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3724>).

Тематика докладов была весьма широка: это и изучение экосистем Белого моря, крупных озер, водохранилищ, а также изучение стока рек Северо-Запада России и водопадов Карелии. Рассмотрены новые разработки по 3D-моделированию экосистемы Белого моря и моделированию динамики развития фитопланктона в крупных проточных водоемах. Доклады сотрудников РГГМУ посвящались изучению малых водотоков средней тайги Северо-Западного Федерального округа, тепловому стоку Северной Двины, классификации методов прогнозирования гидрологических явлений. Сотрудники ИНОЗ СПб ФИЦ РАН представили результаты расчета эвапотранспирации на тер-

ритории бассейна Ладожского озера и оценки твердого стока рек Северо-Запада РФ.

На секции «Гидрохимия» один из девяти докладов сделал представитель ИВПС КарНЦ РАН, три доклада ученые ИВПС представили совместно с коллегами из других институтов и пять докладов прозвучали от представителей других организаций (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3733>).

На секции рассмотрены актуальные вопросы оценки степени загрязнения и качества воды, организации мониторинговых исследований и методические аспекты проведения гидрохимических исследований. Рассмотрены закономерности распределения углеводов в воде и донных осадках Карского и Баренцева морей. Показано, что природные процессы, происходящие в Баренцевом море, оказывают большее влияние на формирование состава и уровней алифатических углеводов и ПАУ, чем антропогенные. Заслушан доклад, посвященный международным исследованиям, проводившимся в 2015–2017 гг. на Онежском озере в рамках российско-швейцарского проекта «Жизнь подо льдом». В результате исследований получены новые данные о сезонной изменчивости химических показателей Петрозаводской губы и открытой части Онежского озера в зимний период, впервые оценено загрязнение воды Онежского озера ртутью, которое, по оценкам авторов, не превышает допустимых нормативов.

В докладе представителей ИВПС КарНЦ РАН и ИО РАН показаны результаты длительных БПК-экспериментов, проведенных на разнотипных водных объектах Карелии. Выполненные исследования позволили классифицировать различные типы БПК-кривых и закономерности их изменения в зависимости от состава воды, а также установить кинетические закономерности трансформации ОВ и оценить вклад взвешенного вещества в процесс его трансформации.

Актуальные проблемы загрязнения водной среды частицами микропластика обсуждались в совместном докладе коллег из ИВПС КарНЦ РАН и АО ИО РАН. Коллективом авторов из ИППЭС КНЦ РАН представлено сообщение о загрязнении урбанизированных озер арктической зоны нефтепродуктами, тяжелыми металлами и их эвтрофировании. В остальных докладах секции рассмотрены актуальные вопросы оценки качества воды по гидрохимическим индексам.

На секции «Развитие Онежского озера и его бассейна в поздне- и послеледниковое время» из заслушанных десяти докладов сотрудни-

ки ИВПС представили четыре доклада и еще шесть – совместно с коллегами из других организаций (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3727>).

В заседании приняли участие 25 участников из 7 научных учреждений. Заседание посвящалось проблеме междисциплинарных исследований процессов накопления осадочного вещества в озерах севера Европы и реконструкций на основе этих исследований истории развития территории в поздне- и послеледниковое время. Целью заседания было собрать коллег из различных научных центров России, работающих в области палеогеографии Онежского озера, для обмена знаниями, полученными в последние годы, и определить перспективы, а также разработать планы дальнейших совместных исследований, тем более что авторы уже несколько лет выполняют совместные исследования по грантам РНФ.

На секции «Гидробиология» представлено десять докладов; один из них сделан представителем ИВПС, еще один – совместный и восемь докладов представлены участниками из других организаций (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3732>).

Доклады были посвящены современным проблемам изучения пресноводных экосистем севера России. Рассмотрены результаты многолетних исследований пространственно-временной динамики альгоценозов в субарктических и арктических морях (на примере кокколитофорид *Emiliania huxleyi*), а также водных сообществ Онежского озера, оз. Имандра, водоемов о. Валаам, озерно-речной системы Пасвик. Большой интерес вызвали материалы анализа спутниковых наблюдений за распространением одноклеточных морских водорослей – кокколитофорид, массовое развитие которых может влиять на потоки углерода вода-атмосфера. Представлен доклад о распространении и биологии северных доминирующих видов амфипод и узкопалых раков в северных водоемах России, особенности их жизненных циклов, метаболизма и питания, что имеет большое значение для понимания современных процессов биоинвазий амфипод, которые отмечаются во многих водоемах Северо-Западного региона России. На конференции обсуждались важнейшие вопросы биоиндикации состояния водных экосистем в условиях воздействия разнообразных источников загрязнения (медно-никелевое, целлюлозно-бумажное производство, отходы форелевых хозяйств и др.).

Более подробно с работой конференции можно ознакомиться на сайте

(<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3724>).

Участники конференции единодушно пришли к выводу о своевременности и важности проведенного мероприятия, положительно высказались о форме его организации – сочетании очных и дистанционных презентаций, стендовых докладов с возможностью их интерактивного обсуждения, а также выразили надежду на участие в новых форумах, которые успешно организует Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Пленарные лекции, секционные презентации, стендовые доклады, представленные на конференции, размещены на сайте института в свободном доступе (<http://water.krc.karelia.ru/event.php?id=352&plang=r>).

Участники конференции подготовили научные статьи, которые представлены в этом издании и будут также опубликованы в следующем номере серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды КарНЦ

РАН» (<http://journals.krc.karelia.ru/index.php/limnology/index>).

Конференция организована ИВПС КарНЦ РАН при поддержке Карельского научного центра РАН (<http://water.krc.karelia.ru/event.php?id=352&plang=r>). Успешно прошли как очные, так и онлайн сообщения, за что оргкомитет выражает благодарность отделу информационно-технического сопровождения.

Организаторы благодарят всех участников за активность в работе юбилейной конференции и надеются на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

Председатель оргкомитета конференции

Н. Н. Филатов;

секретарь оргкомитета конференции

Т. И. Регеранд;

члены научного комитета Н. М. Калинкина,

Г. Э. Здоровеннова, А. В. Толстиков,

Н. А. Белкина, М. Б. Зобков

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 учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет 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 анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылается электронная версия анкеты 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 опубликованием авторам высылается распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185000, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отрецензированы авторами.

Объём 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. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: trudy@krc.karelia.ru или представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

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 – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, 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 (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); двуязычные таблицы (на русском и английском языках); рисунки; подписи к рисункам на русском и английском языках.

Сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (с указанием почтового индекса) на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен 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. 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 вклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» 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) либо начальным словом библиографического описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. На полях бумажного экземпляра 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, поясняются 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 при первичной подаче материала в редакцию вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в формате TIFF (*.TIF) или JPG. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указанием желательного размера рисунка, 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, элек-

* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

тронного 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 приводятся на русском и английском языках, 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, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в 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.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. 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.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические описания русскоязычных работ даются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать ее. Описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатных онлайн-сервисов транслитерации, вариант BSI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт 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

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °C) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (Hadrobregmus confuses Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle Hadrobregmus confuses Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

(а) – электронная микрофотография кварца; (б) – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; (в) – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

(a) – electron microphotograph of the quartz sample; (б) – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; (в) – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

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.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 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.

References:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

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., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

References:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. [Biol. Bull. Reviews]. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

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.

References:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdйствиyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk, 2006. 481 p.

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.

References:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optiko-elektronnyi apparat [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков 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.

References:

Grebenshchikov Ya. P. K nebol'shому kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 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. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. Elektron. b-ki [Digital library]. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Demografija. Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

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.

References:

Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

No. 4, 2021

“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY”

TABLE OF CONTENTS

EDITORIAL	5
N. N. Filatov, N. A. Belkina, G. S. Borodulina, M. B. Zobkov, N. M. Kalinkina, L. E. Nazarova, A. V. Litvinenko, T. I. Regerand, A. V. Ryzhakov, E. V. Tekanova, A. V. Tolstikov. MAJOR RESULTS OF BASIC AND APPLIED RESEARCH AT THE NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE KarRC RAS (A REVIEW)	6
HYDROPHYSICS. HYDROLOGY	
S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova, S. D. Golosov, I. S. Zverev. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE “CATCHMENT – WATERCOURSE – RESERVOIR” SYSTEM	40
A. P. Lepikhin, E. V. Venitsianov, T. P. Lyubimova, A. A. Tiunov, Ya. N. Parshakova, Yu. S. Lyakhin, A. V. Bogomolov. EFFECTS OF THE VERTICAL HETEROGENEITY OF WATER MASSES ON THE STABILITY OF INDUSTRIAL WATER SUPPLY IN INDUSTRY-INTENSIVE AREAS	53
M. S. Potakhin, A. V. Tolstikov, M. S. Bogdanova, A. P. Georgiev, I. Yu. Georgievsky, S. B. Potakhin. STUDY OF KARELIAN WATERFALLS BY THE NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE, KARELIAN RESEARCH CENTRE RAS	64
HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS	
A. N. Novigatsky, V. P. Shevchenko, A. A. Klyuvitkin, M. D. Kravchishina, N. V. Politova. SEDIMENTOGENESIS IN THE WHITE SEA	78
I. A. Nemirovskaya, A. V. Khramtsova, I. S. Khalikov, E. V. Koltovskaya, A. S. Solomatina. HYDROCARBONS IN WATER AND SEDIMENTS OF THE NORWEGIAN AND BARENTS SEAS	94
D. V. Ivanov, E. V. Osmelkin, I. I. Ziganshin. SPATIAL REGULARITIES OF CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS ACCUMULATION IN LAKE SEDIMENTS OF THE CHUVASH REPUBLIC	108
HYDROBIOLOGY	
O. V. Morozova, R. P. Tokinova, D. V. Ivanov. ECOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASSESMENT OF LAKE KOMSOMOLSKOYE WATER QUALITY UNDER URBANIZATION	119
PALEOLIMNOLOGY	
T. S. Shelekhova, Yu. S. Tikhonova, O. V. Lazareva. LATE GLACIAL AND HOLOCENE NATURAL ENVIRONMENT DYNAMICS AND EVOLUTION OF LAKE OKUNOZERO, SOUTH KARELIA: MICROPALAEONTOLOGICAL DATA	134

RESEARCH METHODS

O. M. Vladimirova, T. R. Eremina, A. V. Isaev, V. A. Ryabchenko, O. P. Savchuk. MODEL SPBEM-2 DEVELOPMENT: ANALYSIS OF SENSITIVITY TO THE DISSOLVED ORGANIC MATTER SETTING	153
--	-----

G. T. Frumin, A. V. Kulinkovich, A. Yu. Gorelyshev. METHODS FOR CALCULATING PERMISSIBLE PHOSPHORUS LOADINGS ON LAKES	163
--	-----

HISTORY OF SCIENCE

M. B. Zobkov, A. V. Sabylina, G. S. Borodulina, A. V. Ryzhakov, N. E. Galakhina, N. A. Efremenko, T. A. Efremova, M. V. Zobkova. HISTORY OF DEVELOPMENT AND MAIN SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF THE LABORATORY FOR HYDROCHEMISTRY AND HYDROGEOLOGY NWPI KarRC RAS	169
---	-----

CHRONICLE

N. N. Filatov, T. I. Regerand, N. M. Kalinkina, G. E. Zdrovennova, A. V. Tolstikov, N. A. Belkina, M. B. Zobkov. Pan-Russian Conference "Fundamental challenges and practical solutions for water conservation and sustainable management in Northwest Russia" celebrating the 30 th anniversary of the Northern Water Problems Institute KarRC RAS and the 75 th anniversary of the Karelian Research Centre RAS (Petrozavodsk, March 19, 2021)	193
--	-----

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	198
------------------------------------	-----

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 4, 2021

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 26.04.2021. Дата выхода 30.04.2021. Формат 60x84¹/₈.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 22,0. Усл. печ. л. 23,9.
Тираж 150 экз. Заказ 652. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50