

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр  
Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

## **КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

№ 3, 2019

Серия ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск  
2019

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. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; 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.; 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](mailto: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. 3, 2019

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

Petrozavodsk  
2019

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); A. S. ISAEV, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; 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.); 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.); 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](mailto: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), 2019  
© Northern Water Problems Institute of KarRC RAS, 2019

## ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.465 (268.46)

### СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСНОВНЫХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В БЕЛОМ МОРЕ В ТЕПЛЫЙ СЕЗОН 2010 ГОДА

**А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, А. В. Толстикова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Анализ архивных спутниковых снимков температуры поверхности моря с мая по сентябрь 2010 года позволил впервые установить черты декадной изменчивости фронтальных зон. Показано, что области, где встречаются экстремальные значения градиентов температуры моря и, соответственно, проявляются поверхностные фронты, занимают значительную площадь моря, локализованную около среднего положения фронтальных линий. В Двинском заливе эта область занимает почти две трети акватории залива, а величина смещения стокового фронта на его западном фланге достигает за месяц 70 км. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне еще недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров размерами до нескольких десятков километров. Наибольшая изменчивость поля температуры в виде возмущений фронтального раздела присуща зоне Горла, и эта динамика является важным элементом водообмена в проливе.

**Ключевые слова:** Белое море; температура поверхности моря; градиент; фронтальная зона; фронт; синоптическая динамика.

#### **A. V. Zimin, A. V. Tolstikova. STRUCTURE AND VARIABILITY OF THE MAIN FRONTAL ZONES IN THE WHITE SEA DURING THE WARM SEASON 2010**

Analysis of archival satellite images of sea surface temperature from May to September 2010 allowed determining the features of the synoptic variability of these frontal zones. It is shown that the regions where extreme values of the sea temperature gradients and surface fronts occur occupy a significant sea area near the middle position of the frontal lines. In Dvinskiy Bay, this region occupies almost two thirds of the bay's water area, and the displacement of the runoff front in its western flank reaches 70 km per month. All the fronts undergo the largest displacements in the first half of the warm season under the influence of synoptic processes and river runoff against the background of insufficient

heating of the upper layer, but their high dynamic activity persists later, manifesting itself in the form of the formation of tongues and meanders up to several tens of kilometers. The greatest variability of the temperature field in the form of perturbations of the frontal section is demonstrated by the Gorlo frontal zone. This dynamics is an important element of water exchange in the strait.

**Key words:** White Sea; sea surface temperature; gradient; frontal zone; front; synoptic dynamics.

## Введение

Фронтальные зоны представляют собой переходные области между водами с различными свойствами и характеризуются сложной внутренней структурой. В качестве признака фронтальной зоны обычно понимается существенное, на порядок, обострение горизонтальных градиентов по сравнению с климатическим значением. Внутри относительно широкой переходной области выделяется узкая поверхность или несколько поверхностей с экстремальными значениями градиентов, называемые фронтальными разделами [Федоров, 1983]. Их пересечение с поверхностью моря образует фронты, которые можно легко проследить, например, на картах температуры поверхности моря (ТПМ) в виде зоны схождения изотерм. Применение данных спутниковых дистанционных наблюдений за ТПМ, охватывающих значительные акватории, позволило перейти к широкомасштабным наблюдениям за характеристиками фронтальных зон [Федоров, 1983].

В Белом море фронтальные зоны образуются под влиянием речного стока, приливов и сезонного прогрева [Гидрометеорология..., 1991], в результате чего формируются стоковые (в Двинском и Онежском заливах) и шельфово-приливные (в проливе Горло и вокруг Соловецких островов) фронты. Первый вид, стоковые разделы, образуются в местах впадения крупных рек или в их эстуариях. Такие фронты возникают на границе потока речных вод и часто являются соленосными, так как отделяют распресненные прибрежные воды от более соленых вод открытого моря. Они обычно характеризуются более резкими градиентами плотности и более узкие по ширине, чем чисто температурные фронты. Второй вид – шельфово-приливные (или структурные, по: [Пантюлин, 2012]) фронты – являются границей между стратифицированными и перемешанными водами моря. В Белом море существует два района с такими фронтами – Горло и район Соловецких островов.

У структурных (также традиционно называемых «приливные») и стоковых фронтов опреде-

лено положение за летний сезон и отмечается их изменчивость, однако в представлениях об их изменчивости существуют большие пробелы, заполнить которые возможно только используя спутниковые наблюдения. Все фронты в теплый период года, с мая по сентябрь, четко прослеживаются по ТПМ (рис. 1), получаемой со спутников [Родионов и др., 2014]. Применение данных дистанционных наблюдений позволило обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную изменчивость ТПМ [Ионов, Шилов, 1996] и положения идентифицируемых по ней фронтальных разделов [Романенков и др., 2016].

Однако, несмотря на констатацию факта наличия значительной изменчивости положения фронтальных разделов, системное описание характеристик фронтальных зон в течение всего теплого периода года, когда фронты прослеживаются в поле ТПМ, отсутствует, хотя такие исследования представляются особо актуальными для понимания функционирования экосистемы моря и распределения биоресурсов. В первую очередь это связано с особенностями расположения моря в высоких широтах, из-за чего над ним наблюдается высокая повторяемость облачности и обеспеченность качественными снимками в оптическом диапазоне спектра неоднородна во времени. По этой причине изменчивость поверхностных проявлений фронтальных разделов исследовалась по осредненным данным, с использованием алгоритмов восстановления [Pozdnyakov et al., 2008], что позволяет получить лишь приблизительную географическую привязку положения фронтов и оценку их характеристик. Уникальная синоптическая ситуация, сложившаяся летом 2010 года, связанная с влиянием устойчивого антициклона, расположившегося над Европейской частью России, впервые позволила получить архив карт ТПМ для акватории моря с минимальным влиянием облачности за весь теплый период года. Уникальный архив ТПМ за 2010 год и лег в основу работы.

Цель работы – описать пространственно-временную изменчивость фронтальных разделов на акватории Белого моря в течение всего теплого сезона (с мая по сентябрь) с де-

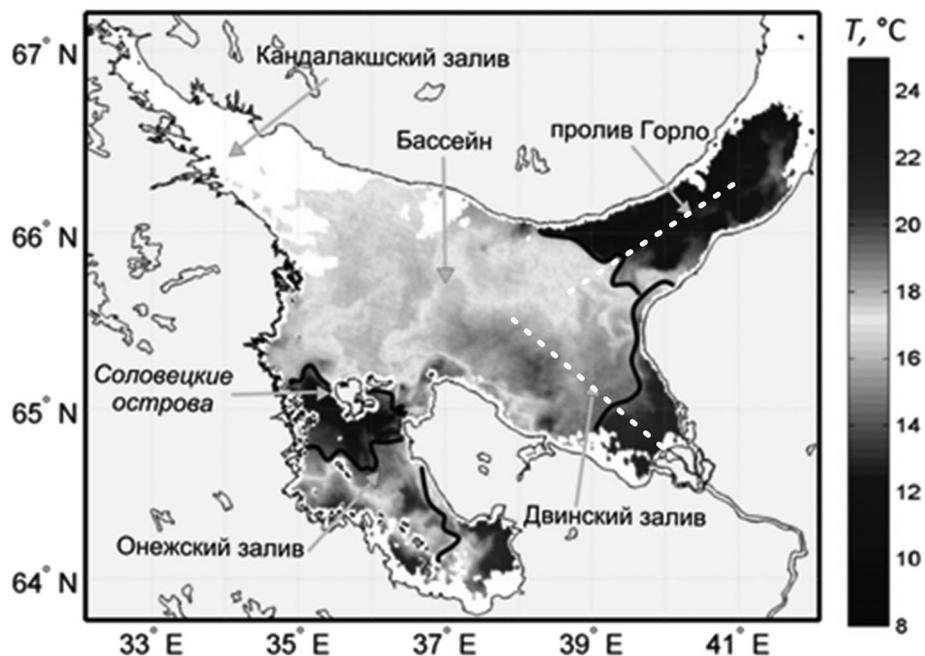


Рис. 1. Температура поверхности Белого моря 04.08.2010/09:10 UTC со спутника Terra. Белые области на карте – районы, закрытые облачностью. Положение поверхностных фронтов показано черными линиями. Пунктирными белыми линиями нанесено положение разрезов ТПМ

Fig. 1. Temperature at the surface of the White Sea 04.08.2010/09:10 UTC from Terra satellite. White colour on the map shows the cloud-covered areas. The location of surface fronts is shown by black lines. White dashed lines indicate the location of the SST sections

сятидневной (синоптической) дискретностью по данным ТПМ.

### Материалы и методы

Для изучения пространственно-временной изменчивости проявлений фронтальных разделов применялись ИК-изображения MODIS со спутников Terra и Aqua. Исходные данные брались с интернет-портала Ocean Colour Web (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) в виде Sea Surface Temperatures (SST) снимков уровня обработки L2 с разрешением по пространству около 1 километра. На предварительном этапе работы был проведен выборочный анализ доступной спутниковой информации по району Белого моря, полученной за теплый сезон с 2009 по 2016 гг. Наибольшее количество свободных от облачности спутниковых изображений было получено в 2010 г., они и были использованы в дальнейшем. Обрабатывались данные за дневное время суток с 1 мая по 30 сентября 2010 года.

В настоящей работе использовались три типа данных: температура поверхности водных объектов (MOD28); маска облаков (MOD35); результаты мониторинга снежного и ледяно-

го покрова (MOD10, 29). Процедура обработки SST-изображений проводилась в несколько этапов. На первом этапе из архива выбирались снимки с достаточной открытостью водной поверхности и с центральным положением в снимке района исследования. На втором этапе подбирались критерии для максимального маскирования облачности и льдов. На третьем этапе выполнялось наложение маски на снимок SST и интерполяция его на стандартную матрицу размерами 550 на 560 км с шагом 1 км, а также наложение карты берега. Четвертый этап заключался в обработке полученной матрицы путем осреднения по декадам всех попавших в одну ячейку значений температуры, после чего вычислялся ее градиент. Градиент оценивался как корень квадратный из суммы квадратов зональной и меридиональной составляющей градиента ТПМ. Ячейки, в которых информация за декаду не поступала, в расчетах не участвовали. Обеспеченность снимками составила в среднем 15 штук за декаду (при минимальном количестве 5 снимков на декаду), при средней открытости снимка около 28 % акватории моря. Всего было обработано 205 снимков, что позволило построить карты ТПМ и ее градиентов по декадам.

По картам среднедекадных градиентов ТПМ выделялись области максимумов, которые идентифицировались как фронтальные зоны. Внутри каждой фронтальной зоны выбирались характерные изотермы ТПМ, соответствующие положению самого интенсивного фронтального раздела, выделенного по карте градиентов. Используя положения характерных изотерм, определяли линию основного фронта для каждой декады. Для идентификации положения фронтальных зон в поле градиента ТПМ использовали критерий двукратного превышения градиента во фронтальной зоне над фоновым градиентом для всего моря, аналогично тому, как это делалось в работе [Ожигин и др., 2016].

Сразу оговоримся, что ширина зоны максимального горизонтального градиента ТПМ во фронтальных зонах меняется согласно работе [Федоров, 1983] от десятков метров до километров. Так как в методике обработки данных использовались значения, осредненные по декадам, они являются заниженными в сравнении с отмечаемыми по данным разовых спутниковых снимков градиентами температуры во фронтальных зонах.

### **Временная изменчивость характеристик фронтальных зон**

В поле градиентов ТПМ нашли отражение все четыре основные фронтальные зоны Белого моря: стоковые (Северной Двины и Онеги), приливные или структурные (Горла и Соловецких островов). Фоновый градиент ТПМ в среднем составил менее  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . При этом средний градиент в областях фронтальных зон равнялся  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Наиболее интенсивными с точки зрения значений градиента (до  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) были районы Онежского залива и Горла. Наименее интенсивно в градиенте ТПМ было отображено положение зоны стокового фронта в Двинском заливе.

Полученное поле градиентов ТПМ позволило выявить многофронтальность рассматриваемых зон. Структуры фронтальных зон в Белом море чаще имели «ступенчатый» [по: Федоров, 1983] характер и состояли из однородных участков, разделенных фронтами одного знака. Пример подобной фронтальной зоны, проявляющейся на разрезе ТПМ в Двинском заливе, представлен на рис. 2, а, где область со «ступенчатой» фронтальной зоной наблюдается с 0 по 80 км разреза. «Перебегающий» характер [по: Федоров, 1983] фронтальных зон, для которого характерно чередование холодных и теплых участков различной интенсивности, разделенных фронтами, чаще всего отмечался в Горловской фронтальной

зоне. Область с «перебегающей» фронтальной зоной наблюдается с 60 по 110 км разреза ТПМ, представленного на рис. 2, б.

Особенно наглядно многофронтальность проявлялась на южной границе Горла и в Онежском заливе, где ширина фронтальных зон колеблется от 40 до 60 километров и включает в себя 4–6 фронтов. В качестве примера приведем характеристики изменчивости Горловской фронтальной зоны за теплый сезон вдоль разреза ТПМ в центральной части пролива (табл. 1).

Из таблицы 1 видно, что средняя ширина фронтальной зоны составляет 45 км, максимальной ширины она достигает в середине лета во 2–3 декаде июля. Средний перепад температуры во фронтальной зоне составляет  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимум около  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечается в конце июля, в августе, минимальный перепад около  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечается в мае и сентябре.

Структура фронтальной зоны в половине случаев имеет «перебегающий» характер. В подобном случае внутри фронтальной зоны отмечается от 3 до 6 фронтальных разделов, средняя ширина которых около 6 км с локальными градиентами от  $0,12$  до  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . В других случаях структура фронтальной зоны имела «ступенчатый» характер. В подобных случаях внутри фронтальной зоны выделялись 2–3 ступеньки протяженностью 10–20 км с достаточно равномерным распределением температуры. Средняя ширина фронтальных разделов составляла около 4 км, градиент  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

Самая обширная по площади и протяженная фронтальная зона, хотя местами не так ярко выраженная, связана с Двинским течением и проявляется в Двинском заливе и восточной границе Горла. Количество фронтальных разделов внутри этой зоны в зависимости от района колеблется от 1 до 5. Представление об изменчивости характеристик фронтальных зон в течение летнего сезона в Двинском и Онежском заливе можно получить из таблиц 2 и 3. Внутрисезонный ход прослеживался в характеристиках обеих фронтальных зон. Лучше всего он отражался в среднем фронтальном градиенте температуры в Онежском заливе. Наибольшая интенсивность фронтальных разделов в обоих заливах отмечалась в июле. Средняя ширина фронта на поверхности в Двинском заливе около 14 км, в Онежском – около 9 км. В Двинском заливе ширина фронтальной зоны в среднем составляла 95 км, в Онежском – менее 40 км, что связано с объемом стока рек. Средний перепад температуры через фронтальную зону был  $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Двинском заливе и  $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Онежском. Средний зональный градиент в Онежском заливе выше почти в два раза.

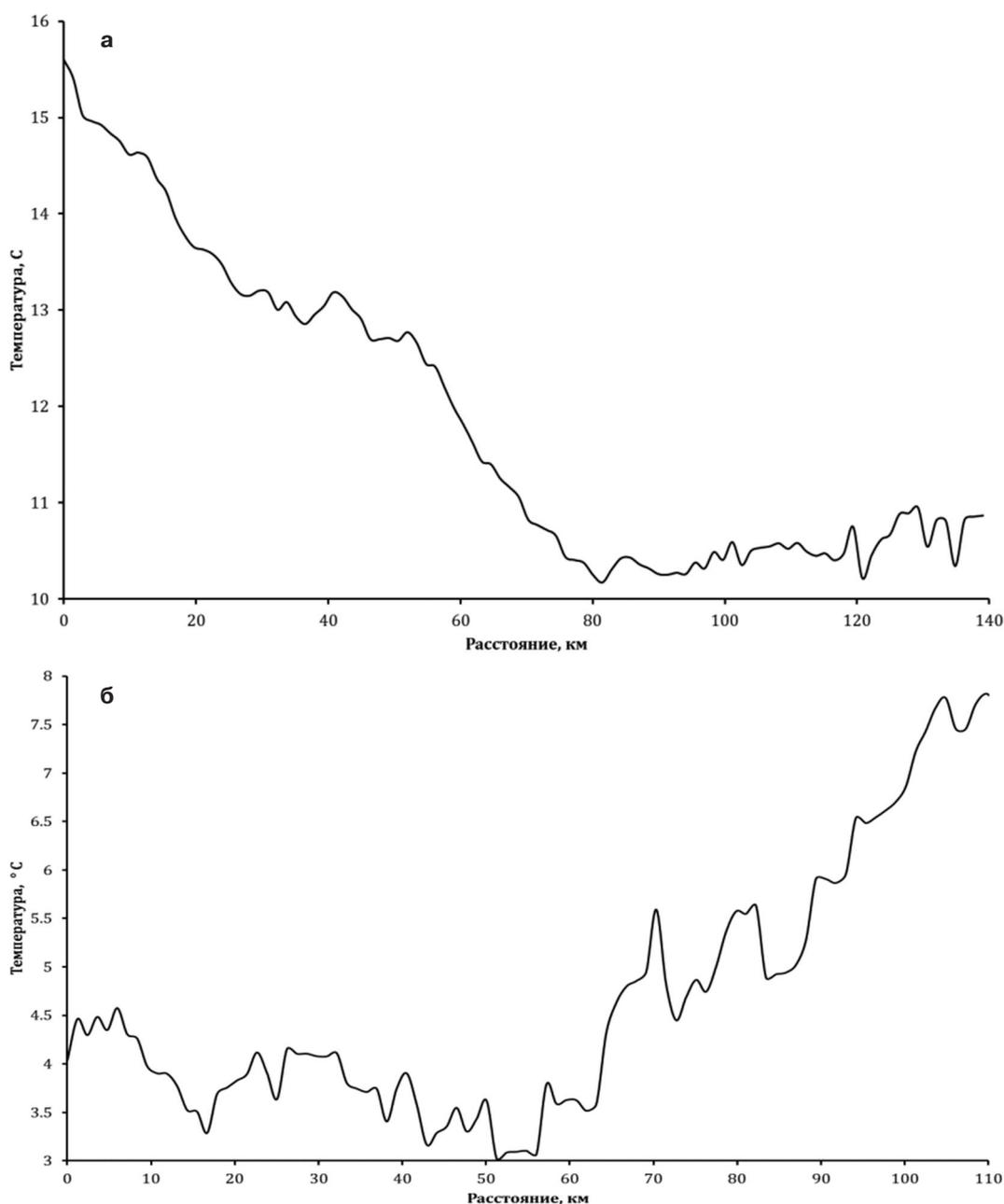


Рис. 2. Распределение ТПМ на разрезе от устья реки Северная Двина до границы Двинского залива и Бассейна по данным за третью декаду июня 2010 года (а) и на разрезе через пролив Горло по данным за первую декаду июля 2010 года (б). Положение разрезов на карте показано на рис. 1

Fig. 2. SST distribution on the section from the Northern Dvina River mouth to the border of Dvinskiy Bay and Basin according to the data for the third ten-day period of June, 2010 (a) and on the section across the Gorlo strait according to the data for the first ten-day period of July, 2010 (b). Sections location is shown in Fig. 1

В качестве обобщения отметим, что описанные зоны стоковых фронтов имеют общие черты: низкий средний зональный градиент; максимальный охват по площади акватории наблюдается в июне; имеются несколько фронтальных разделов; фронты быстро меняют свое положение при интенсивном воздействии вет-

ра, по данным сопоставления с архивом NCEP/NCAR. Среднее расстояние между фронтами внутри фронтальных зон составляет до нескольких десятков километров.

Около Соловецких островов фронтальная зона представляет собой весьма сложную двойную структуру. В районе проливов Запад-

Таблица 1. Сравнительные характеристики структуры Горловской фронтальной зоны

Table 1. Comparative characteristics of the structure of the Gorlo frontal zone

Время: декада, месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны, км Width of the frontal zone, km	Среднезональный градиент, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
2, май 2, May	39	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,22 (0,12–0,28)
1, июнь 1, June	52	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,31 (0,23–0,38)
2, июнь 2, June	48	0,09	Перебежающийся, 5 Alternating, 5	0,20 (0,14–0,28)
3, июнь 3, June	41	0,10	Перебежающийся, 5 Alternating, 5	0,27 (0,14–0,45)
1, июль 1, July	48	0,11	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,28 (0,24–0,31)
2, июль 2, July	56	0,11	Перебежающийся, 5 Alternating, 5	0,33 (0,20–0,58)
3, июль 3, July	57	0,12	Перебежающийся, 6 Alternating, 6	0,34 (0,22–0,48)
1, август 1, August	36	0,14	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,30 (0,29–0,30)
2, август 2, August	40	0,17	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,38 (0,29–0,53)
3, август 3, August	38	0,09	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,13 (0,13–0,15)
1, сентябрь 1, September	40	0,08	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,12 (0,12–0,13)
2, сентябрь 2, September	47	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,12 (0,12–0,13)

Таблица 2. Сравнительные характеристики структуры Двинской фронтальной зоны

Table 2. Comparative characteristics of the structure of the Dvina frontal zone

Время: декада и месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны (ФЗ), км Width of the frontal zone (FZ), km	Среднезональный градиент ФЗ, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
1, май 1, May	93	0,06	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,19 (0,14–0,28)
2, май 2, May	143	0,07	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,16 (0,12–0,18)
3, май 3, May	101	0,05	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,18 (0,11–0,21)
2, июнь 2, June	81	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,16 (0,15–0,16)
3, июнь 3, June	81	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,13 (0,12–0,14)
1, июль 1, July	103	0,05	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,21 (0,11–0,28)
2, июль 2, July	84	0,07	Перебежающийся, 3 Alternating, 3	0,15 (0,12–0,27)
3, июль 3, July	86	0,05	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,14 (0,14–0,14)
1, август 1, August	114	0,05	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,13 (0,11–0,22)
2, август 2, August	71	0,06	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,18 (0,16–0,27)

Таблица 3. Сравнительные характеристики структуры Онежской фронтальной зоны

Table 3. Comparative characteristics of the structure of the Onega frontal zone

Время: декада и месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны, км Width of the frontal zone, km	Среднезональный градиент ФЗ, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
1, май 1, May	51	0,05	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,15 (0,12–0,17)
2, май 2, May	39	0,09	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,16 (0,11–0,18)
1, июнь 1, June	40	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,22 (0,19–0,31)
2, июнь 2, June	41	0,12	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,23 (0,20–0,27)
3, июнь 3, June	40	0,15	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,23 (0,21–0,26)
1, июль 1, July	37	0,20	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,23 (0,22–0,23)
2, июль 2, July	41	0,18	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,30 (0,21–0,59)
3, июль 3, July	49	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,18 (0,17–0,29)
1, август 1, August	52	0,08	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,13 (0,11–0,28)

ная и Восточная Соловецкие салмы и северной части Онежского залива наблюдается зона с низкими значениями температур на поверхности. Образование этой зоны связано с интенсивным приливным перемешиванием в проливах и на мелководье. Южнее этой области, в районах, где интенсивность приливно-го потока ослабевает, перемешивание становится менее интенсивным, стратификация выражена лучше и поверхностный слой содержит менее соленые и более теплые воды. В результате область структурного фронта в данном районе включает в себя два фронтальных раздела: северный и южный. Она является буфером из нестратифицированных вод, разделяющих воды Бассейна и Онежского залива.

Представление об изменчивости фронтов в течение летнего сезона по усредненным данным разрезов ТПМ в Западной и Восточной Соловецких салмах можно получить из таблицы 4. В характеристиках фронтальных зон прослеживался четко выраженный сезонный ход. Фронты начинали формироваться в мае, а разрушались в сентябре. Наибольшие градиенты на фронтах отмечались в первой декаде августа. Всегда четко прослеживался фронт в области северной части Соловецкой фронтальной зоны. Изменение характеристик ветра не оказывало значительного влияния на динамику фронтальной зоны. Она испытывала только слабые вариации на южном фронтальном разделе.

### Пространственная изменчивость основных фронтальных разделов

Результаты выделения положения основного фронтального раздела внутри каждой фронтальной зоны за сезон и по декадам для каждого месяца приведены на рис. 3.

Из рис. 3, а, видно, что фронт располагается поперек пролива Горло зигзагообразной линией. Особенно сложно идентифицировать его положение около Зимнего берега, где он взаимодействует со стоковым фронтом реки Северная Двина. Декадное положение фронта по месяцам (рис. 3, б–е) показывает его меандрирующий характер. Несмотря на значительную локальную изменчивость его положения по декадам, все колебания фронта прослеживаются около его климатического положения на южной границе Горла. Образование языков и меандров размером до нескольких десятков километров наиболее четко наблюдается в августе (рис. 3, д), когда фронт особенно ярко прослеживается в поле градиентов температуры (табл. 1).

Наиболее интенсивная пространственная динамика характерна для Двинского стокового фронта в части, прилегающей к Летнему берегу. В течение мая граница фронта сдвигается к западу более чем на 70 км. Столь значительная изменчивость положения фронтальных разделов в Двинском заливе может являться

Таблица 4. Сравнительные характеристики структуры Соловецкой фронтальной зоны

Table 4. Comparative characteristics of the structure of the Solovetsky frontal zone

Время: декада, месяц Time: ten-day period, month	Часть фронтальной зоны Part of the frontal zone	Ширина фронта средняя, км Average width of the front, km	Фронтальный градиент средний, °С/км Average frontal gradient, °C/km
2, май 2, May	Северная Northern	12	0,09
	Южная Southern	14	0,07
3, май 3, May	Северная Northern	12	0,11
	Южная Southern	15	0,10
2, июнь 2, June	Северная Northern	12	0,18
	Южная Southern	11	0,12
3, июнь 3, June	Северная Northern	10	0,17
	Южная Southern	11	0,15
1, июль 1, July	Северная Northern	10,	0,21
	Южная Southern	11,	0,19
2, июль 2, July	Северная Northern	12	0,20
	Южная Southern	10	0,19
3, июль 3, July	Северная Northern	12	0,27
	Южная Southern	10	0,17
1, август 1, August	Северная Northern	11	0,32
	Южная Southern	9	0,31
2, август 2, August	Северная Northern	12	0,31
	Южная Southern	9	0,29
3, август 3, August	Северная Northern	14	0,12
	Южная Southern	13	0,11
1, сентябрь 1, September	Северная Northern	14	0,11
	Южная Southern	14	0,10
2, сентябрь 2, September	Северная Northern	14	0,10
	Южная Southern	14	0,08

источником развития интенсивного вихреобразования.

Во фронтальной зоне около Соловецких островов северный и южный фронт имеют обозна-

чения чисто условные. Вследствие отбраковки данных спутниковых наблюдений в прибрежной 5-километровой зоне проследить положение фронта севернее архипелага не всегда

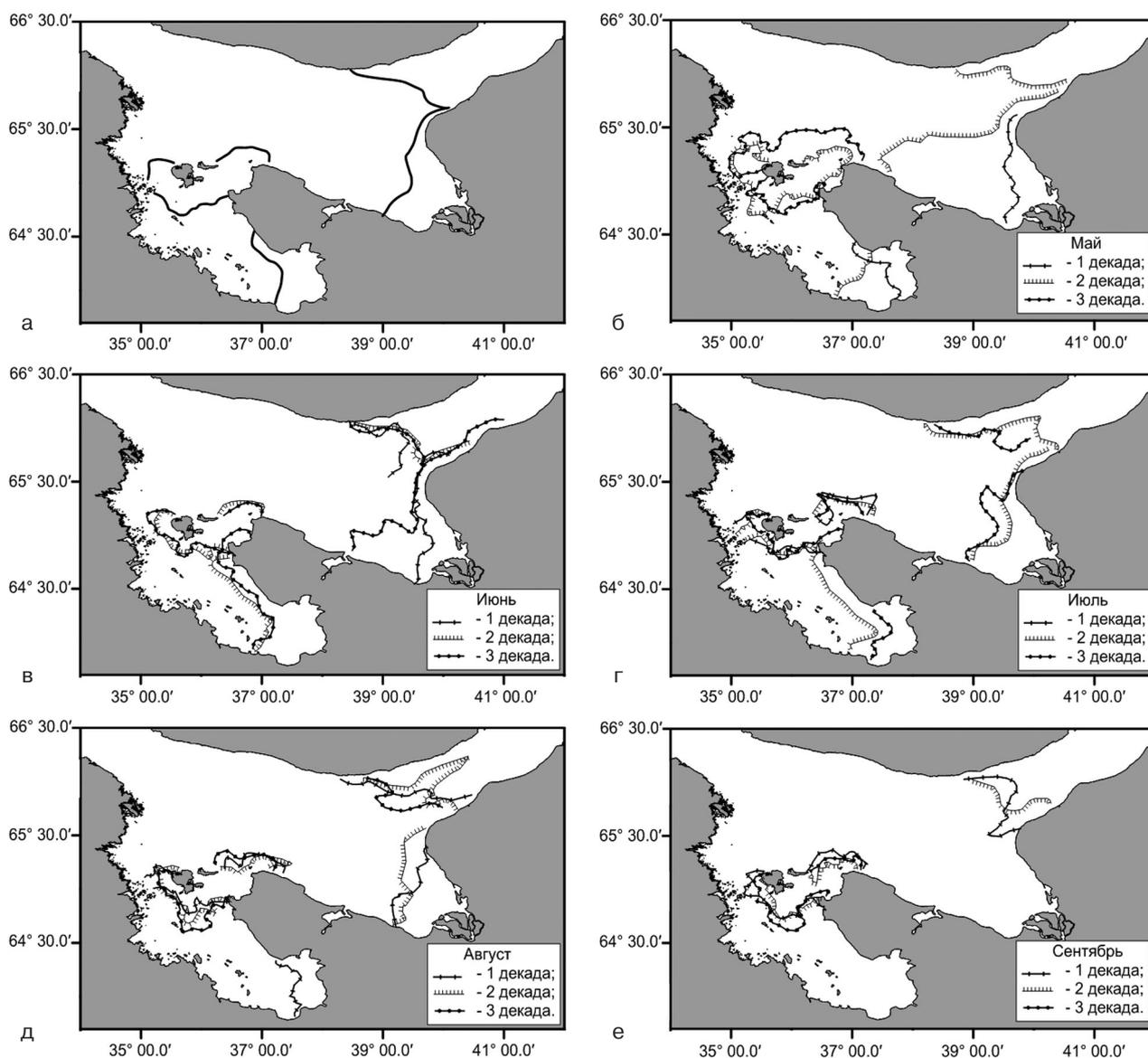


Рис. 3. Схемы расположения основных фронтов по данным спутниковых наблюдений в Белом море за теплый сезон (а) и с мая по сентябрь (б–е) за 2010 год

Fig. 3. Schematic maps of the main fronts according to the data of the satellite observation over the White Sea during the warm period (a) and from May to September (б–е) in 2010

представляется возможным. В этом случае северный фронт условно разделялся на фронтальные разделы Западной и Восточной Соловецких салм. Причем в отдельные декады в Западной Соловецкой салме северный и южный раздел могут смыкаться, образуя фронт, направленный вдоль оси пролива.

Стоковый фронт в южной вершине Онежского залива имеет дугообразную форму и прижат к Лямецкому берегу. Его положение может за декаду изменяться более чем на 25 километров и, соответственно, сильно отклоняться от среднего.

Из описания следует, что все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой по-

ловине теплого сезона под влиянием, очевидно, синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров размером до нескольких десятков километров.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что все четыре основные фронтальные зоны Белого моря четко прослеживались в поле ТПМ, при этом ширина фронтальных зон колеблет-

ся от 10 до 140 километров и включает в себя от 1 до 6 фронтов, максимальные градиенты на фронтах прослеживаются в июле-августе. Структуры фронтальных зон чаще всего имели «ступенчатый» характер. Характерный градиент ТПМ на фронте составлял от 0,1 до 0,6 °С/км. Декадная изменчивость градиента температур на фронте максимальна в Горловской фронтальной зоне и достигает 0,3 °С. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона. Смещение за декаду может достигать 40 километров, а за месяц 70 километров.

Использование уникального архива ТПМ, охватывающего весь теплый период (май–сентябрь) 2010 года, показало, что наряду с сезонной и приливной динамикой значительную роль в изменчивости фронтальных разделов в Белом море играют процессы синоптического масштаба различного генезиса. Использование декадных данных представляется оптимальным для корректной оценки внутрисезонного хода фронтальной динамики в Белом море.

*Авторы выражают благодарность И. Е. Козлову и О. А. Атаджановой за помощь в обработке спутниковых данных.*

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).*

## Литература

*Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.*

## References

*Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. T. 2. Beloe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the Seas of the USSR. Vol. 2. The White Sea. Part 1: Hydrometeorological conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 240 p.*

*Fedorov K. N. Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov [Physical nature and structure of oceanic fronts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 296 p.*

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

*Ionov V. V., Shilov I. O. Osobennosti rasprostraneniya rechnykh vod i dinamiki okeanologicheskikh frontov v Belom more po rezul'tatam sputnikovykh IK-izmere-*

*Zimin A. V. Zakonomernosti submезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГМУ. 2016. № 44. С. 104–120.*

*Ионов В. В., Шилов И. О. Особенности распространения речных вод и динамики океанологических фронтов в Белом море по результатам спутниковых ИК-измерений и натурным наблюдениям в летний период // Вестник СПбГУ. 1996. Сер. 7. Вып. 2, № 14. С. 53–61.*

*Пантюлин А. Н. Структура и динамика водного тела Белого моря. Динамика, структура и водные массы // Система Белого моря. Том II. Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 309–379.*

*Родионов А. А., Романенков Д. А., Зимин А. В., Козлов И. Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 29–41.*

*Романенков Д. А., Зимин А. В., Родионов А. А., Атаджанова О. А., Козлов И. Е. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 1. С. 59–72.*

*Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 296 с.*

*Филатов Н. Н., Терзевик А. Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.*

*Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Анциферов М. Ю. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.*

*Pozdnyakov D., Korosov A., Pettersson L. H. Visible and infrared remote sensing of the White Sea Bio-Geo-Chemistry and Hydrology // Remote Sensing of the European Seas. 2008. P. 129–140.*

*Поступила в редакцию 16.07.2018*

*nii i naturnym nablyudeniym v letnii period [Features of the river waters distribution and oceanographic fronts dynamics in the White Sea according to the results of the satellite IR images and field observations in summer]. Vestnik SPbGU [Vestnik of St. Petersburg Univ.]. 1996. Ser. 7, iss. 2, no. 14. P. 53–61.*

*Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost' [Waters of the Barents Sea: structure, circulation, and variability]. Murmansk: PINRO, 2016. 260 p.*

*Pantulin A. N. Struktura i dinamika vodnogo tela Belogo morya. Dinamika, struktura i vodnye massy. Sistema Belogo morya. T. II. Vodnaya tolshcha i vzaimodeistvuyushchaya s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera [Structure and dynamics of the water body of the White Sea. The dynamics, structure, and wa-*

ter masses. The White Sea System. Vol. II. Water column and interaction with atmosphere, cryosphere, biosphere, and river flow]. Moscow: Nauchnyi mir, 2012. P. 309–379.

Rodionov A. A., Romanenkov D. A., Zimin A. V., Kozlov I. E., Shapron B. Submezomasshtabnye struktury vod Belogo morya i ikh dinamika. Sostoyanie i napravleniya issledovaniy [Submesoscale processes and their dynamics in the White Sea. State of the art and future research]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2014. Vol. 7, no. 3, P. 29–41.

Romanenkov D. A., Zimin A. V., Rodionov A. A., Atadzhanova O. A., Kozlov I. E. Izmenchivost' frontal'nykh razdelov i osobennosti mezomasshtabnoi dinamiki vod Belogo morya [Variability of frontal sections and fea-

tures of mesoscale dynamics of the White Sea waters]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2016. Vol. 9, no. 1. P. 59–72.

Zimin A. V. Zakonomernosti submezomasshtabnykh protsessov i yavlenii v Belom more [Patterns of submesoscale processes and phenomena in the White Sea]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. Russ. St. Hydrometeorological Univ.]. 2016. No. 44. P. 104–120.

Pozdnyakov D., Korosov A., Pettersson L. H. Visible and infrared remote sensing of the White Sea Bio-Geo-Chemistry and Hydrology. *Remote Sensing of the European Seas*. 2008. P. 129–140.

Received July 16, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Зимин Алексей Вадимович**

руководитель лаб. геофизических пограничных слоев, главный научный сотрудник, д. г. н. Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997

ведущий 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: zimin2@mail.ru

### **Толстик Алексей Владимирович**

руководитель лаб. географии и гидрологии, старший 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: alexeytolstikov@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Zimin, Aleksey**

P. P. Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: zimin2@mail.ru

### **Tolstikov, Aleksey**

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

УДК 535.8:556.5

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

О. Б. Акулова, В. И. Букатый, К. В. Марусин

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

Представлены результаты исследований пространственного распределения первичных гидрооптических характеристик – показателя ослабления света  $\varepsilon$  озерной водой при длине волны 550 нм, показателя поглощения света желтым веществом  $\kappa_{\text{жв}}$  при длине волны 450 нм, относительной прозрачности  $Z$ , измеренной с помощью диска Секки, полученных летом 2018 г. в ходе экспедиций лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН на Телецком озере (Горный Алтай). Значения  $\varepsilon$  за исследуемый период находились в диапазоне  $0,4\text{--}2,3\text{ м}^{-1}$ ,  $\kappa_{\text{жв}} - 0,5\text{--}3,0\text{ м}^{-1}$  (рассчитаны при натуральном основании логарифма),  $Z - 1,0\text{--}11,7\text{ м}$ . Концентрация желтого вещества, рассчитанная по измеренному коэффициенту пропускания желтым веществом, варьировала в пределах  $2,6\text{--}14,1\text{ г/м}^3$ , концентрация хлорофилла –  $0,4\text{--}1,8\text{ мг/м}^3$ . По данным химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН, среднее значение концентрации общего фосфора в поверхностном слое озера за исследуемый период составило  $10,8\text{ мг/м}^3$ , общего азота –  $731,3\text{ мг/м}^3$ , общего углерода –  $3,35 \cdot 10^3\text{ мг/м}^3$ . Также рассчитан относительный спектральный вклад основных оптически активных компонентов озерной воды (чистой воды, желтого вещества, взвеси, хлорофилла) в показатель ослабления света по акватории исследуемого водоема. Выявлено, что во всех точках (всего 22 точки отбора проб) озера максимальный вклад в  $\varepsilon$  вносит желтое вещество. Показано, что оптическая структура исследуемого водоема и пространственная изменчивость гидрооптических характеристик тесно связаны с гидрологическим режимом Телецкого озера, с метеорологическими условиями региона и с различными оптически активными компонентами воды, концентрации которых изменяются как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоемных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором. Анализ пространственного распределения показателей ослабления и поглощения света желтым веществом озерной воды показал, что озеро Телецкое существенно отличается не только своими гидрооптическими характеристиками, но также и гидробиологическими, гидрохимическими характеристиками, следовательно, общее ослабление света озерной водой может служить объективным маркером гидрофизической структуры водоема и его экологического состояния.

**Ключевые слова:** показатели ослабления и поглощения света; прозрачность по диску Секки; растворенное органическое вещество; желтое вещество; хлорофилл; взвесь.

### **O. B. Akulova, V. I. Bukatyi, K. V. Marusin. SPATIAL VARIABILITY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE TELETSKOYE**

The paper presents the results of studies of the spatial distribution of primary hydro-optical characteristics, in particular, light attenuation  $\varepsilon$  by lake water at a wavelength of 550 nm, light absorption by yellow substance  $\kappa_{\text{ys}}$  at a wavelength of 450 nm, and rela-

tive transparency  $Z$  measured with Secchi disk. The data were obtained in summer 2018 during field surveys of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of IWEF SB RAS on Lake Teletskoye (Altai Mountains). The values of  $\varepsilon$  for the study period were within  $0.4\text{--}2.3\text{ m}^{-1}$ ,  $\kappa_{ys} - 0.5\text{--}3.0\text{ m}^{-1}$  (calculated at natural logarithm base),  $Z - 1.0\text{--}11.7\text{ m}$ . The yellow substance concentration calculated by the measured transmittance of yellow substance, varied within  $2.6\text{--}14.1\text{ g/m}^3$ , the chlorophyll concentration –  $0.4\text{--}1.8\text{ mg/m}^3$ . According to the data from the chemical analytical center of IWEF, the average concentration of total phosphorus in the surface layer of the lake during the study period was  $10.8\text{ mg/m}^3$ , total nitrogen –  $731.3\text{ mg/m}^3$ , total carbon –  $3.35 \cdot 10^3\text{ mg/m}^3$ . Besides, the relative spectral contribution of major optically active components of lake water (pure water, yellow substance, suspended matter and chlorophyll) to light attenuation across the lake water area was estimated. It was found that yellow substance makes the largest contribution to  $\varepsilon$  at all sampling points (22) of the lake. It is shown that the optical structure of the lake and the spatial variability of hydro-optical characteristics are closely related to the hydrological regime of the lake, meteorological conditions in the region and various optically active water components, whose concentration changes both in time and space under the influence of processes inside the lake in association with the catchment. The analysis of the spatial distribution of the indices of light attenuation and absorption by yellow substance in the lake water showed that Lake Teletskoye stands out not only for its hydro-optical characteristics, but also its hydrobiological and hydrochemical characteristics. Hence, the total light attenuation by lake water can serve as an objective marker of the hydrophysical structure of the lake and its ecological state.

**Key words:** coefficients of light attenuation and absorption; Secchi disk transparency; dissolved organic matter; yellow substance; chlorophyll; suspended matter.

## Введение

Водные экосистемы (от океанских и морских до небольших континентальных водоемов и водотоков) с чрезвычайно разнообразными условиями существования, определяющими их естественное функционирование, представляют интерес как с научной теоретической точки зрения для понимания принципов и механизмов их функционирования, так и с практической, связанной прежде всего с проблемами качества питьевой воды, а также проблемами эффективности рыболовства, использования для рекреационных целей и т. д. Например, всестороннее изучение озер невозможно без регулярных систематических исследований гидрооптических показателей, характеризующих состояние водных объектов и процессы их изменчивости на основе широкого использования измерительных приборов и методов. Известно [Оптика..., 1983; Шифрин, 1983; Маньковский, 1996; Апонасенко, 2001; Левин, 2014], что гидрооптические характеристики, используемые для количественной оценки условий распространения света в воде, разделяются на первичные, характеризующие оптические свойства природных вод (показатели ослабления, поглощения и рассеяния света, индикаторы и матрицы рассеяния света, коэффициент пропускания слоя водной среды, относительная прозрачность) и вторичные, описывающие состояние светового поля в природных водах

и в атмосфере над ними (яркость, облученность и др.).

Значения первичных гидрооптических характеристик, а именно величины спектрального показателя ослабления света зависят от количественного и качественного составов взвешенных частиц, хлорофилла, растворенного в воде органического вещества, а также от их спектрального вклада в этот показатель [Ерлов, 1980; Копелевич, Шифрин, 1981; Матюшенко и др., 2001; Маньковский, Маньковская, 2008; Маньковский, 2011; Kirk, 2011; Thrane et al., 2014; Slade, Boss, 2015; Shi et al., 2017; Betancur-Turizo et al., 2018]. В работах [Маньковский, Земляная, 1989; Апонасенко, 2001; Левин и др., 2011] проводились попытки выявить зависимость между показателем ослабления света  $\varepsilon$  и относительной прозрачностью по диску Секки  $Z$ , но однозначной зависимости не получено. На основании проделанных работ ряд исследователей приходят к выводу, что приближенно  $\varepsilon = \frac{\alpha}{Z}$ , где  $\alpha$  – постоянная величина, которая применительно к разным водным объектам изменяется от 0,8 до 10. Уже этот факт показывает, что глубина исчезновения белого диска  $Z$  не связана однозначным образом с показателем ослабления света.

Анализ пространственного распределения значений  $\varepsilon$  показал, что оно зависит от физико-химико-биологических и динамических процессов, интенсивность, изменчивость, пе-

риодичность и масштабы которых в пространстве водоемов неодинаковы [Матюшенко и др., 1995; Кукушкин и др., 2004, 2010; Матюшенко, 2005; Маньковский, 2012].

Цель работы – изучить особенности пространственного распределения гидрооптических характеристик Телецкого озера, а также оценить спектральный вклад показателей поглощения и рассеяния света основными оптически активными компонентами озерной воды в показатель ослабления света в поверхностном слое водоема летом 2018 г.

## Материалы и методы

**Объект исследования.** Исследования проводили летом 2018 г., в период с 19 по 23 июня, на Телецком озере (51°21'46"–51°48'36" с. ш., 87°14'40"–87°50'54" в. д.), расположенном в северо-восточной части Горного Алтая. Озеро Телецкое – самое глубокое в Западной Сибири, оно занимает 39 место среди глубочайших озер мира. Восточный берег и часть акватории входят в состав Алтайского государственного природного биосферного заповедника «Алтайский». В 1998 г. озеро включено ЮНЕСКО в Список объектов мирового наследия в составе комплексного объекта «Золотые горы Алтая». Основные морфометрические и батиметрические характеристики исследуемого водоема [Селегей и др., 2001]: площадь зеркальной поверхности – 227,3 км<sup>2</sup>; площадь водосборного бассейна – 20 400 км<sup>2</sup>; длина по медиане – 78,6 км; длина береговой линии – 192,8 км; максимальная ширина – 5,2 км; средняя ширина – 2,9 км; максимальная глубина – 323,0 м; средняя глубина – 181,0 м; объем – 41,0 км<sup>3</sup>; средняя высота зеркала озера над уровнем моря, рассчитанная за многолетний период 1931–1999 гг., – 434,0 м. Бассейн озера представляет собой горную страну со средней высотой гор 1940 м, отдельные вершины на юго-востоке достигают высоты 3000–3350 м, на крайнем северо-западе – 700–1300 м. Телецкое озеро имеет вытянутую руслообразную форму и состоит из двух частей: меридиональной, южной, протяженностью 50 км, с глубинами 100–323 м, и широтной, северо-западной, протяженностью 28 км, с глубинами 10–40 м. Южную часть озера, в свою очередь, можно условно разделить на подзоны: пелагиаль, сублитораль и литораль. Литоральная и сублиторальная зоны по площади незначительны, но различны по морфометрическим характеристикам, строению дна и берегов, климатическим, ледово-термическим и другим особенностям режима [Селегей, Селегей, 1978]. По сравнению с пе-

лагиальной (глубоководной) литоральная зона в Телецком озере имеет ряд особенностей, одна из которых – значительное гидродинамическое воздействие, связанное с интенсивными ветроволновыми процессами (максимальная высота волны до 3,5 м) и со значительными (до 6 м) ежегодными колебаниями уровня воды. Суточные колебания в июне достигают 50–60 см. Подъем уровня наблюдается в период талых вод (апрель–июнь), затем происходит плавный спад, нарушаемый дождевыми паводками в июле–октябре. Наивысший уровень приходится на июнь – период снеготаяния в горах, минимальный уровень наблюдается в марте. На озере круглогодично отмечаются сейши высотой 0,5–6 см. Полный водообмен в озере происходит за 5–7 лет. Особенности волнового режима на водоеме обусловлены наличием здесь ветровых потоков двух господствующих направлений: с юга на север дует «верховка», в противоположном направлении – «низовка». При «верховке» стоит ясная солнечная погода, а «низовка» сопровождается понижением температуры, осадками и сильным волнением – высота волн может достигать 3,0–3,5 м. Телецкое озеро – единственный из сибирских пресноводных водоемов, на котором полный ледостав периодически отсутствует. В районе северо-западного мелководья оно замерзает в конце ноября, в области нарастания глубин у мыса Ажи – в конце января, в южной части озера – в начале февраля. Вскрытие водоема происходит в конце апреля – начале мая. По данным космоснимков, вскрытие озера в 2018 г. началось 12 апреля, к 22 апреля площадь водной поверхности, освобожденной от льда, составила свыше 70 %. В середине мая озеро освободилось от льда полностью. По классификациям Иосимур и Фореля Телецкое озеро относится к водоемам умеренного типа, для которых характерна смена прямой и обратной стратификации, разделенных периодами осенней и весенней гомотермии [Селегей и др., 2001]. Озеро димиктичное с двумя периодами конвективного перемешивания до максимальных глубин – май–июль и октябрь–декабрь. Впадает в озеро около 70 рек и 150 временных водотоков, причем 70 % всей воды дает река Чулышман, впадающая с юга. Отдавая свои воды реке Бие (98 % водостока), озеро в значительной мере обеспечивает питание реки Оби. Изрезанность береговой линии озера выражена слабо, бухт и заливов мало, самые большие – Камгинский и Кыгинский с площадью 6,5 и 3,1 км<sup>2</sup> соответственно. Камгинский залив – самый мелководный, защищенный от волнений и наиболее благоприятный для

высшей водной растительности (которая в озере развита слабо) по термическому режиму и характеру грунтов из всех заливов Телецкого озера. В связи с тем, что зарастание озера наблюдается только в этих заливах, приустьевых участках крупных рек и в районе северо-западного мелководного плеса, по интенсивности зарастания водоем можно считать слабо зарастающим. По гидрохимическому режиму это слабоминерализованный, богатый кислородом горный водоем с низкими температурами, с незначительным содержанием органических и биогенных веществ в воде.

**Методы измерений.** Измерения гидрооптических характеристик в пробах воды, взятых с поверхностного слоя озера (это глубина, т. е. расстояние от границы воздух – водная поверхность, 10–15 см), проводили с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ в режиме измерений коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды, затем рассчитывали показатель ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$ . В данном исследовании гидрооптические характеристики определяли только в поверхностном слое водоема, распределение их по глубинам в озере нами рассматривалось, но в эту работу материал не был включен. Точки отбора проб и их координаты представлены в табл. 1. Показатель поглощения света желтым веществом  $\kappa_{жв}(\lambda)$  определяли после измерения спектральной прозрачности озерной воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. В общей сложности за период экспедиций было обработано и проанализировано 22 пробы, проведено 528 отдельных измерений коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды на приборе. Для всех проб выполнялось по два измерения (до и после фильтрации проб) для каждой из длин волн в диапазоне от 400 до 800 нм (12 спектральных участков). Расчеты проводили по формуле  $\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T(\lambda))$ , вытекающей из закона Бугера, где  $L$  – длина кюветы,  $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$  – прозрачность в относительных единицах,  $I(\lambda)$ ,  $I_0(\lambda)$  – интенсивности прошедшего и падающего света соответственно,  $\lambda$  – длина волны света. Погрешность определения величины  $\varepsilon(\lambda)$  обусловлена систематической относительной погрешностью измерения коэффициента пропускания  $(\Delta T(\lambda)/T(\lambda)) \cdot 100\%$  с помощью спектрофотометра (по паспорту прибора), систематической погрешностью определения длины кюветы  $(\Delta L/L) \cdot 100\%$  и случайной погрешностью измерений коэффициента пропускания. Максимальная абсолютная погрешность показателя ослабления света и по-

казателя поглощения света желтым веществом составила около  $0,1 \text{ м}^{-1}$ . В работе также проводили измерения относительной прозрачности  $Z$  с использованием диска Секки.

Для обработки гидрооптических данных использовали пакет программ Microsoft Excel как наиболее известный и доступный [Макарова, Трофимец, 2002]. Дополнительно определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно [ГОСТ..., 2003] концентрацию хлорофилла  $Chl_a$  в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона, концентрацию общего фосфора  $P_{общ}$  [РД..., 2006], общего азота  $N_{общ}$  [ГОСТ..., 2016] и общего углерода  $C_{общ}$  [ГОСТ..., 2013].

По методике из статьи [Маньковский, 2015], измерив  $\kappa_{жв}(450)$  при  $\lambda = 450$  нм, определяли концентрацию желтого вещества в озерной воде по формуле  $C_{жв} = \kappa_{жв}(450)/\kappa_{уд.жв}(450)$ , где  $C_{жв}$  – концентрация желтого вещества, в  $\text{г/м}^3$ ,  $\kappa_{уд.жв}(450)$  – удельный показатель поглощения света желтым веществом, в  $\text{м}^2/\text{г}$ . В работе [Nyquist, 1979] рассчитаны значения  $\kappa_{уд.жв}(\lambda)$  при длине волны 450 нм. Поэтому вопрос, насколько величина  $\kappa_{уд.жв}(450)$ , приводимая в ней, является универсальной, т. е. пригодной для различных крупных водных объектов, до сих пор считается неясным. С учетом предложенного в [Маньковский, 2015] подхода рассчитаны значения  $C_{жв}$  с использованием величины  $\kappa_{уд.жв}(450)$ , взятой из работы [Nyquist, 1979]. В настоящее время в научной литературе отсутствуют данные, которые бы свидетельствовали о неприемлемости данного подхода, рассмотренного в [Nyquist, 1979] и использованного известным ученым В. И. Маньковским [2015]. Это характеризуется также и тем, что процессы образования желтого вещества (оно появляется двумя путями: непосредственно в самом водоеме – при распаде отмершего планктона, живых организмов и продуктов их жизнедеятельности и извне – путем смыва с водосбора гумусовых веществ) в различных крупных водных объектах являются близкими.

Относительный спектральный вклад компонентов озерной воды (чистой воды, желтого вещества, взвеси, хлорофилла) в  $\varepsilon$  в поверхностном слое исследуемого озера рассчитан с использованием спектральной физической модели ослабления света, предложенной О. В. Копелевичем в работе [Оптика..., 1983]. Модифицированная модель ослабления света описана более подробно в [Суторихин и др., 2016].

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были получены первичные гидрооптические ха-

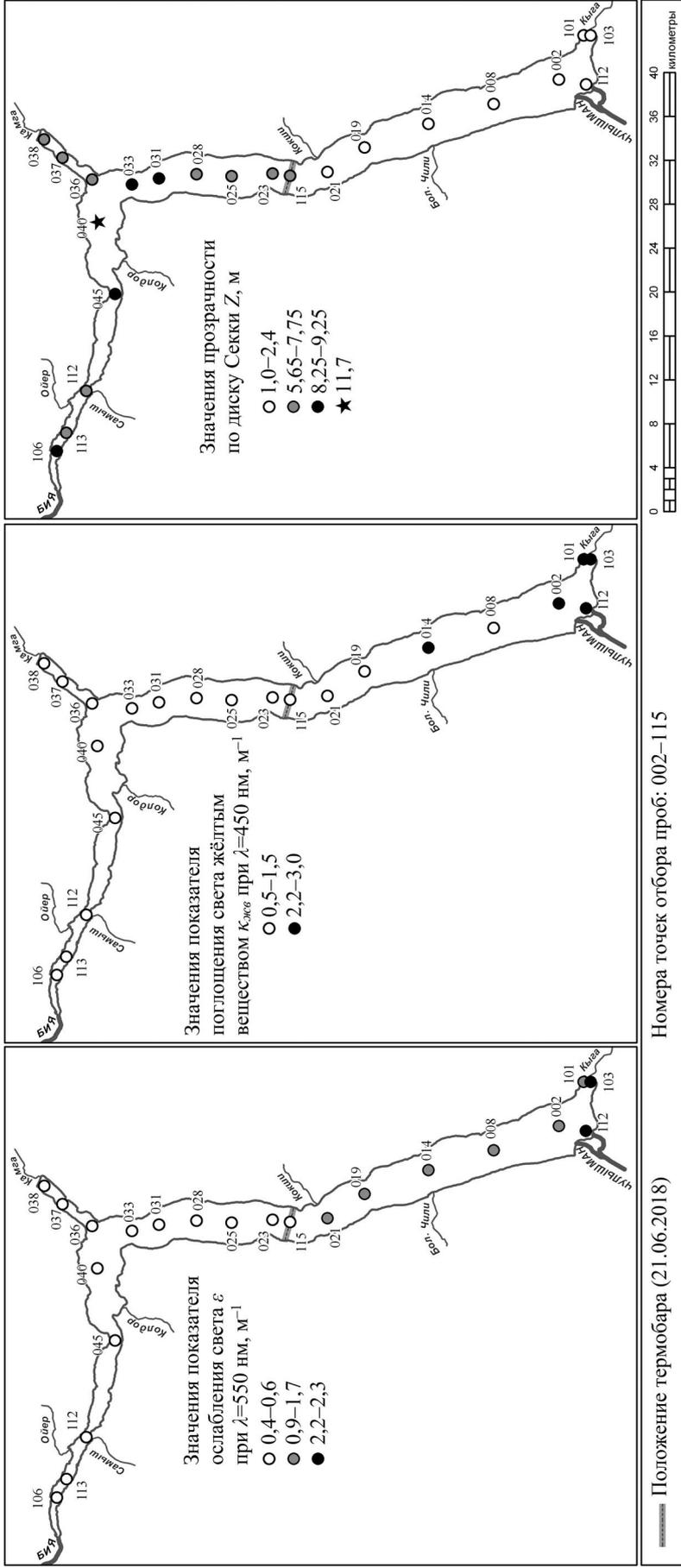
Таблица 1. Точки отбора проб и их координаты

Table 1. Sampling sites and their coordinates

Точки Points	Топонимическое название Toponymic name	Координаты Coordinates
002	р. Чулышман (пелагиаль) riv. Chulyshman (pelagial)	N51.377979°, E87.785950°
008	п. Беле (пелагиаль) sett. Bele (pelagial)	N51.431219°, E87.754759°
014	р. Чулюш (пелагиаль) riv. Chulyush (pelagial)	N51.484329°, E87.729600°
019	м. Сыракту (пелагиаль) cape Syraktu (pelagial)	N51.536389°, E87.699309°
021	р. Кокши (пелагиаль) riv. Kokshi (pelagial)	N51.566719°, E87.667690°
023	м. Вакты (пелагиаль) cape Vaktu (pelagial)	N51.611369°, E87.666289°
025	р. Адамыш (пелагиаль) riv. Adamysh (pelagial)	N51.644630°, E87.663039°
028	р. Талду-Коол (пелагиаль) riv. Taldu-Kool (pelagial)	N51.673009, E87.666040°
031	р. Б. Корбу (пелагиаль) riv. B. Korbu (pelagial)	N51.703650°, E87.661079°
033	м. Отык-Таш (пелагиаль) m. Otyk-Tash (pelagial)	N51.725529°, E87.653270°
036	р. Камга (пелагиаль) riv. Kamga (pelagial)	N51.757910°, E87.660340°
037	р. Камга (пелагиаль) riv. Kamga (pelagial)	N51.781840°, E87.689480°
038	р. Камга (литораль) riv. Kamga (littoral)	N51.796559°, E87.713940°
040	п. Яйлю (пелагиаль) sett. Yaiyu (pelagial)	N51.753989°, E87.604159°
045	м. Ажу (пелагиаль) cape Azhu (pelagial)	N51.740009°, E87.508769°
101	р. Кыга (пелагиаль) riv. Kuga (pelagial)	N51.357529°, E87.823099°
103	р. Кыга (литораль) riv. Kuga (littoral)	N51.351900°, E87.843240°
106	с. Артыбаш (пелагиаль) sett. Artybash (pelagial)	N51.787989°, E87.301630°
111	р. Чулышман (литораль) riv. Chulyshman (littoral)	N51.356019°, E87.779039°
112	р. Самыш (пелагиаль) riv. Samysh (pelagial)	N51.763839°, E87.381160°
113	Каменный залив (пелагиаль) Kamennyi Bay (pelagial)	N51.780219°, E87.325799°
115	Граница Термобара (21.06.18) Termobar's border (21.06.18)	N51.597008°, E87.663134°

рактеристики – показатели ослабления света  $\varepsilon$  и поглощения света желтым веществом  $\kappa_{жв}$ , а также относительная прозрачность  $Z$ , пространственное распределение которых представлено на рисунке. Так, вблизи устьев рек Чулышман и Кыга (в литоральной зоне) величины показателя ослабления света при длине волны 550 нм имели максимальные значения – 2,2 и 2,3 м<sup>-1</sup> соответственно. Очевидно, что это связано с интенсивным выносом взвесей (преимущественно терригенного происхождения) речными водами и процессами разрушения берегов. В этой зоне прибрежного мелководья ветроволновые течения поднимают донные осадки и перемешивают их по всей водной толще. Соответственно, здесь будут минимальные

значения прозрачности  $Z$ , определяемой по глубине исчезновения диска Секки, – 1,0–2,4 м, на которую заметно влияют взвешенные в воде вещества. По мере проникновения в Телецкое озеро (в пелагиальную зону) на север до границы термобара (в области двух температурных зон в точке 115 температура воды в поверхностном слое южнее этой точки (теплый слой) составила +10...+12 °С, севернее (холодный слой) – +3,6...+4,0 °С) значения  $\varepsilon$  понижаются до 0,9–1,7 м<sup>-1</sup>. Термобар влияет на экосистему озера, так как он разделяет две зоны с разными характеристиками воды, что определяет пространственные различия не только гидрооптических характеристик, но и гидробиологических. А вот по величинам  $\kappa_{жв}$  при длине вол-



Картограмма распределения гидрооптических характеристик Телецкого озера  
Schematic map of hydrooptical characteristics distribution of Lake Teletskoye

ны 450 нм видно, что в основном оптическая структура поверхностного слоя в южной части озера (до м. Сыракту) практически однородна (исключение – район поселка Беле, в точке 008 –  $1,5 \text{ м}^{-1}$ ), где значения варьировали в пределах  $2,2\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$ , с уменьшением их в северо-западной части водоема до  $0,5\text{--}1,5 \text{ м}^{-1}$ . На картосхеме отчетливо прослеживается повышение прозрачности вод в глубоководной части озера, где зафиксирована максимальная относительная прозрачность – 11,7 м, дополнительным подтверждением этому служит и распределение величин  $\varepsilon$  с пониженными значениями ( $0,4\text{--}0,6 \text{ м}^{-1}$ ), которые наблюдались в широтной северо-западной части исследуемого водоема. Конечно, гидрооптическая структура Телецкого озера тесно связана с его гидрологическим режимом и метеорологическими условиями региона, а также с оптически активными компонентами воды, концентрации которых изменяются как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоемных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором. А так как водосбор – это территория суши, с которой вода с осадочным и растворенным в ней материалом стекает в водоем, то количественный и качественный состав оптически активных компонентов воды и их соотношение будут разными по акватории озера.

В соответствии с метеоданными, полученными с помощью метеостанций научно-исследовательского судна, дневная температура воздуха в период исследования (19–23 июня) изменялась от  $+9,2$  до  $+30,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Скорость ветра варьировала в пределах  $0,0\text{--}8,9 \text{ м/с}$ , атмосферное давление –  $716,1\text{--}722,6 \text{ мм. рт. ст.}$ , влажность –  $41\text{--}88 \%$ . Температура поверхностного слоя воды в различных точках отбора проб была в пределах  $+3,6\text{...}+15,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Говоря о климате, следует сказать, что в целом климат долины озера континентальный: в горах суровый с очень холодной зимой, а внизу, в прибрежной полосе, мягкий. Здесь ярко выражена так называемая вертикальная зональность. В противоположных концах озера в любое время года температура воздуха также неодинакова. Среднегодовая температура воздуха в южной части озера положительная (около  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), тогда как в северной (село Артыбаш) она едва превышает один градус. Особенностью климата является то обстоятельство, что в любое время года в горах бывают отрицательные температуры, а у озера в течение всей зимы положительные. В горах и в летнее время наблюдаются значительные суточные колебания температуры. Наиболее увлажненный район бассейна озера северный. Здесь выпадает до

1000 мм осадков в год, тогда как в южной части вдвое меньше. Наибольшее количество осадков приходится на летние месяцы, поэтому в целом лето дождливое, но с частыми прояснениями [Селегей, Селегей, 1978].

Рассчитанные значения концентрации желтого вещества  $C_{\text{жв}}$  в поверхностном слое озера Телецкое за исследуемый период находились в диапазоне  $2,6\text{--}14,1 \text{ г/м}^3$  (табл. 2) со средним значением  $6,5 \text{ г/м}^3$ . По данным [Coble, 2007] считается, что желтое вещество составляет до 70 % растворенного органического вещества, которое в значительной степени определяет оптические свойства природных вод, влияя на глубину фотического слоя и играя важную роль в ряде биохимических и фотохимических процессов. В результате расчетов спектрального вклада компонентов озерной воды в спектральный показатель ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$  для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что максимальный вклад в  $\varepsilon(\lambda)$  вносит именно желтое вещество. Наибольший вклад желтого вещества при  $\lambda = 430 \text{ нм}$  приходится на пелагиаль рек Камга (точка 036) и Чулышман (точка 002), где он составляет 94,1 и 90,9 % соответственно. При длине волны 550 нм вклад желтого вещества варьирует в пределах от 40,0 % (точка 025 – пелагиаль р. Адамыш) до 91,3 % (точка 103 – литораль р. Кыга). Взвесь дает максимальный вклад в показатель ослабления при  $\lambda = 430 \text{ нм}$  в точке 119 (пелагиаль м. Сыракту) и составляет 33,4 %. Вклад взвеси возрастает до 47,8 % (точка 025) при  $\lambda = 550 \text{ нм}$ . Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при  $\lambda = 430 \text{ нм}$  на всех точках и составляет не более 0,4 %, но этот вклад резко увеличивается в длинноволновой области – до 14,1 % при  $\lambda = 550 \text{ нм}$ . Вклад хлорофилла при  $\lambda = 430 \text{ нм}$  находился в диапазоне от 1,8 % (точка 021 – пелагиаль р. Кокши) до 5,0 % (точка 115 – граница термобара, 21.06.2018), при  $\lambda = 550 \text{ нм}$  – от 0,3 % (точка 021) до 1,2 % (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю). Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимого вклада и составляет около 0,1 %.

Дополнительно для определения трофического статуса озера рассчитывали концентрации хлорофилла  $a$   $Chl_a$ , которые за исследуемый период (19–23 июня 2018 г.) находились в диапазоне  $0,4\text{--}1,8 \text{ мг/м}^3$ , средняя величина составила  $0,8 \text{ мг/м}^3$ . Максимальные значения  $Chl_a$  выявлены для мелководных, защищенных от волноприбойных процессов хорошо прогреваемых участков зарастающей макрофитами литорали. Минимальные значения  $Chl_a$  в по-

Таблица 2. Лимнологические характеристики Телецкого озера

Table 2. Limnological characteristics of Lake Teletskoye

Точки Points	Z, м Z, m	$\varepsilon(550)$ , м <sup>-1</sup> $\varepsilon(550)$ , m <sup>-1</sup>	$\kappa_{жв}(450)$ , м <sup>-1</sup> $\kappa_{ys}(450)$ , m <sup>-1</sup>	$C_{жв}$ , г/м <sup>3</sup> $C_{ys}$ , g/m <sup>3</sup>	$Chl_a$ , мг/м <sup>3</sup> $Chl_a$ , mg/m <sup>3</sup>	$P_{общ}$ , мг/м <sup>3</sup> $P_{tot}$ , mg/m <sup>3</sup>	$N_{общ}$ , мг/м <sup>3</sup> $N_{tot}$ , mg/m <sup>3</sup>	$C_{общ}$ , мг/м <sup>3</sup> $C_{tot}$ , mg/m <sup>3</sup>
002	1,25	1,6	2,6	12,4	1,4	13,0	523,0	1700
008	1,7	0,9	1,5	7,0	0,8	<10,0	812,0	4200
014	1,4	1,6	2,2	10,6	1,0	14,0	764,0	6700
019	1,25	1,2	1,3	6,3	1,2	12,0	742,0	3200
021	2,4	1,0	1,4	6,4	0,5	<10,0	653,0	5700
023	5,65	0,6	1,0	5,0	0,6	<10,0	822,0	2000
025	5,75	0,5	0,5	2,6	0,7	<10,0	692,0	4600
028	6,25	0,6	1,1	5,2	0,5	<10,0	752,0	2800
031	8,5	0,4	0,7	3,4	0,4	<10,0	782,0	<1500
033	8,3	0,4	0,7	3,4	0,5	<10,0	802,0	<1500
036	7,3	0,6	1,3	6,1	0,7	<10,0	932,0	<1500
037	7,3	0,6	1,3	6,1	0,7	<10,0	562,0	<1500
038	6,5	0,6	1,0	4,4	0,4	<10,0	802,0	1700
040	11,7	0,5	1,0	4,4	0,9	<10,0	472,0	9100
045	9,25	0,4	0,7	3,4	0,6	<10,0	842,0	<1500
101	1,2	1,7	2,4	11,5	1,3	13,0	504,0	3400
103	1,25	2,3	3,0	14,1	1,8	12,0	526,0	1900
106	8,25	0,4	1,0	4,5	0,5	<10,0	992,0	2500
111	1,0	2,2	2,5	12,0	1,5	14,0	445,0	3500
112	7,5	0,6	1,3	6,1	0,5	<10,0	812,0	5300
113	7,75	0,4	0,7	3,5	0,6	<10,0	1032,0	2100
115	5,75	0,6	1,2	5,8	1,0	<10,0	824,0	5600

Примечание. Z – относительная прозрачность, измеренная с помощью диска Секки,  $\varepsilon(550)$  – спектральный показатель ослабления света при  $\lambda = 550$  нм,  $\kappa_{жв}(450)$  – спектральный показатель поглощения света желтым веществом при  $\lambda = 450$  нм,  $C_{жв}$  – концентрация желтого вещества,  $Chl_a$  – концентрация хлорофилла а,  $P_{общ}$  – концентрация общего фосфора,  $N_{общ}$  – концентрация общего азота,  $C_{общ}$  – концентрация общего углерода.

Note. Z – Secchi disk transparency,  $\varepsilon(550)$  – spectral coefficients of light attenuation at  $\lambda = 550$  nm,  $\kappa_{жв}(450)$  – spectral coefficients of light absorption by yellow substance at  $\lambda = 450$  nm,  $C_{жв}$  – concentration of yellow substance,  $Chl_a$  – concentration of chlorophyll a,  $P_{tot}$  – concentration of the total phosphorus,  $N_{tot}$  – concentration of the total nitrogen,  $C_{tot}$  – concentration of the total carbon.

верхностном слое отмечены на участках открытой пелагиали. Активный волноприбойный процесс и изменение уровня воды в озере создают нестабильные условия для вегетации водорослей фитопланктона. Наличие фосфора в воде Телецкого озера отмечено во всех точках отбора проб. Его содержание в поверхностном слое колебалось в интервале <10,0–14,0 мг/м<sup>3</sup> (табл. 2) со средним значением за период исследования, равным 10,8 мг/м<sup>3</sup>. Средняя величина концентрации общего азота составила 731,3 мг/м<sup>3</sup>, общего углерода – 3,35·10<sup>3</sup> мг/м<sup>3</sup>. Согласно классификации [Оксиюк и др., 1993] по содержанию биогенных элементов качество воды озера Телецкое соответствует разряду «очень чистых» и «вполне чистых» вод.

Для определения трофности исследуемого водоема наряду с трофическим индексом Карлсона (Trophic State Index) [Carlson, 1977] использовали рассчитанные нами значения спектрального показателя ослабления света [Суторихин и др., 2016]. В результате экспериментов установлено, что трофический статус оз. Телецкое в различных точках отбора проб можно охарактеризовать как олиготрофный водоем с элементами мезотрофии на литорали, на участках впадения крупных притоков и расположения населенных пунктов.

## Заключение

На примере пресноводного слабоминерализованного холодноводного проточного горного водоема (Телецкое озеро, Горный Алтай) в работе проанализировано пространственное распределение первичных гидрооптических характеристик – спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света желтым веществом по измерениям коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды в пробах, отобранных в поверхностном слое и профильтрованных через мембраны с диаметром пор 0,22 мкм, а также относительной прозрачности воды, измеренной с помощью диска Секки. В условиях особенного гидрологического, а также сложного гидротермического режимов Телецкого озера, которые обусловлены большой глубиной, господством постоянных горных ветров в горной долине, значительным внешним водообменом (5–7 лет) и значительным влиянием водосборного бассейна (отношение площади водного зеркала к площади водосбора равно 1:90; для сравнения: у озера Байкал – 1:17) формируются зоны с различными гидрооптическими характеристиками ( $\varepsilon$  и  $\kappa_{жв}$ ), значения которых в литоральной (прибрежной

мелководной) части водоема в местах впадения рек Чулышман и Кыга выше, чем в глубоководной (пелагиальной) части. Рассчитаны концентрации хлорофилла, желтого вещества и биогенных элементов, в распределении которых по акватории озера наблюдается неоднородность. Определен спектральный вклад оптически активных компонентов (чистой воды, желтого вещества, взвеси и хлорофилла) в показатель ослабления света для поверхностного слоя озера в различных точках отбора проб. Отмечен максимальный вклад желтого вещества в суммарное ослабление света. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических характеристик при исследовании крупных озер для наблюдения за распространением уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворенных веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния вод.

*Выражаем благодарность сотрудникам химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН под руководством д. х. н. Т. С. Папиной за предоставленные данные измерений концентраций общего фосфора, азота и углерода, А. В. Дьяченко – за метеоданные.*

*Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта ИВЭП СО РАН № 0383-2016-0002 «Изучение гидрологических и гидрофизических процессов в водных объектах и на водосборах Сибири и их математическое моделирование для стратегии водопользования и охраны водных ресурсов».*

## Литература

Апонасенко А. Д. Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Красноярск, 2001. 316 с.

ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.

ГОСТ 31958–2012. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с.

ГОСТ 33045–2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ (с поправкой). М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

Ерлов Н. Г. Оптика моря / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.

Копелевич О. В., Шифрин К. С. Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 4–55.

Кукушкин А. С., Агафонов Е. А., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Изменчивость прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном

слое северо-западной части Черного моря // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 870–881.

Кукушкин А. С., Воскресенская Е. Н., Маслова В. Н. Особенности формирования поля прозрачности в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в зимне-весенний период // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 730–736.

Левин И. М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.

Левин И. М., Родионов М. А., Французов О. Н. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 5. С. 59–63.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Маньковский В. И. Желтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 3. С. 53–61.

Маньковский В. И. Основы оптики океана (методическое пособие). Севастополь: Изд-во МГИНАНУ, 1996. 119 с.

Маньковский В. И. Оптические характеристики вод восточной части северо-западного шельфа Черного моря в весенний период // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 61–68.

Маньковский В. И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 5. С. 14–29.

Маньковский В. И., Земляная Л. А. Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. С. 82–85.

Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Использование биооптических связей для определения характеристик состояния морской среды при проведении оптического мониторинга в Черном море с применением прозрачномеров // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 2. С. 37–45.

Матюшенко В. А. Пространственно-временная изменчивость гидрооптических характеристик Белого моря // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: Материалы IX Междунар. конф. (Петрозаводск, 11–14 октября 2004 г.). Петрозаводск, 2005. С. 215–223.

Матюшенко В. А., Лукин Л. Р., Хоменко Г. Д., Галеркин Л. И. Показатель ослабления света и его связи с гидрологическими характеристиками и содержанием взвешенного вещества в водах Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А. Л. Лисицына, М. Е. Виноградова, Е. А. Романкевича. М.: Научный мир, 2001. С. 432–442.

Матюшенко В. А., Попов И. К., Мисюченко И. Л. Пространственное распределение показателя ослабления света в водах Карского моря // ДАН РФ. 1995. Т. 342, № 3. С. 403–406.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

Оптика океана / Под ред. А. С. Монины. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 372 с.

РД 52.24.387–2006. Массовая концентрация фосфора общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2006. 31 с.

Селегей В. В. Телецкое озеро: очерки истории. Кн. 3. Барнаул: Пять плюс, 2011. 244 с.

Селегей В. В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я., Высоцкий Е. М., Перепелова Т. И. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера // Тр. Департамента геологии и минералогии. Королевский Музей Центральной Африки, Тервюрен, Бельгия. 2001. Т. 105. 310 с.

Селегей В. В., Селегей Т. С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.

Суторихин И. А., Букатый В. И., Харламова Н. Ф., Акулова О. Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края / Отв. ред. В. Н. Седалищев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т вод. и экол. проблем; М-во образования и науки РФ, Алт. гос. ун-т. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.

Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.

Betancur-Turizo S. P., González-Silvera A. G., Santamaría-Del-Ángel E., Millán-Núñez R., Millán-Núñez E., García-Nava H., Godínez V. M., Sánchez-Velasco L. Va-

riability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California // Open Journal of Marine Science. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 20–37. doi: 10.4236/ojms.2018.81002

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369.

Coble P. G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of Ocean color // Chemical Rev. 2007. Vol. 107. P. 402–418.

Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 649 p. doi: 10.1017/CBO9781139168212

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances: PhD Thesis, Dept. Analytical and Marine Chemistry, Göteborg University, Göteborg, Sweden, 1979. 200 p.

Shi L., Mao Z., Wu J., Liu M., Zhang Y., Wang Z. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu // Water. 2017. Vol. 9, iss. 5. 352 p. doi: 10.3390/w9050352

Slade W. H., Boss E. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size // Applied Optics. 2015. Vol. 54, no. 24. P. 7264–7277. doi: 10.1364/AO.54.007264

Thrane J. E., Hessen D. O., Anderson T. The absorption of light in lakes: negative impact of organic carbon on primary productivity // Ecosystems. 2014. Vol. 17, iss. 6. P. 1040–1052. doi: 10.1007/s10021-014-9776-2

Поступила в редакцию 29.11.2018

## References

Aponasenko A. D. Kolichestvennyye zakonomernosti funktsional'noi organizatsii vodnykh ekosistem v svyazi s ikh dispersnoi strukturoi [Quantitative regularities of the functional organization of water ecosystems in connection with their disperse structure]: DSc. (Dr. of Fiz.-Mat.). Krasnoyarsk, 2001. 316 p.

GOST 17.1.4.02–90. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a [Spectrophotometric determination of chlorophyll a]. Moscow: Izd-vo standartov, 2003. P. 587–600.

GOST 31958–2012. Voda. Metody opredeleniya sodержaniya obshchego i rastvorenного organicheskogo ugleroda [Water. Methods for determination of total and dissolved organic carbon]. Moscow: Standartinform, 2013. 12 p.

GOST 33045–2014. Voda. Metody opredeleniya azotsoderzhashchikh veshchestv (s popravkoi) [Water. Methods for determination of nitrogen-containing matters (corrected)]. Moscow: Standartinform, 2016. 20 p.

Erlöv N. G. Optika morya [Sea optics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 248 p.

Kopelevich O. B., Shifrin K. S. Sovremennyye predstavleniya ob opticheskikh svoistvakh morskoi vody [Modern ideas of optical properties of sea water]. Optika okeana i atmosfery [Optics of ocean and atmosphere]. Moscow: Nauka, 1981. P. 4–55.

Kukushkin A. S., Agafonov E. A., Burlakova Z. P., Ereemeeva L. V. Izmenchivost' prozrachnosti i sodержaniya vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo morya [Variability of transparency and content of suspended substance in surface layer of the north-western part of the Black Sea]. Okeanologiya [Oceanology]. 2004. Vol. 44, no. 6. P. 870–881.

Kukushkin A. S., Voskresenskaya E. N., Maslova V. N. Osobennosti formirovaniya polya prozrachnosti v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo morya v zimne-vesennii period [The features of transparency field generation in the surface layer of the north-western part of the Black Sea in winter-spring period]. Optika atmosfery i okeana [Optics of ocean and atmosphere]. 2010. Vol. 23, no. 8. P. 730–736.

Levin I. M. Maloparametricheskyye modeli pervichnykh opticheskikh kharakteristik morskoi vody [Few-parameter optical models of primary optical properties of sea water]. Fund. i priklad. gidrofizika [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2014. Vol. 7, no. 3. P. 3–22.

Levin I. M., Rodionov M. A., Frantsuzov O. N. Pogruzaemyi izmeritel' pokazatelya oslableniya sveta morskoi vodoi [The immersed measuring instrument of an indicator of light attenuation by sea water]. Opticheskii zhurnal [J. Optical Tech.]. 2011. Vol. 78, no. 5. P. 59–63.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

Man'kovskii V. I. Zheltoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh vostochnoi chasti Tropicheckoi Atlantiki [Yellow substance in surface waters of the eastern part of the Tropical Atlantic]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2015. No. 3. P. 53–61.

Man'kovskii V. I. Osnovy optiki okeana (metodicheskoe posobie) [Fundamentals of optics of the ocean: a study guide]. Sevastopol': Izd-vo MGINANU, 1996. 119 p.

Man'kovskii V. I. Opticheskie kharakteristiki vod vostochnoi chasti severo-zapadnogo shel'fa Chernogo morya v vesennii period [Optical characteristics of waters in the eastern part of the north-western shelf of Black Sea during the spring period]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2012. No. 4. P. 61–68.

Man'kovskii V. I. Spektral'nyi vklad komponentov morskoi vody v pokazatel' oslableniya napravlennoogo sveta v poverkhnostnykh vodakh Sredizemnogo morya [Spectral contribution of sea water components in the indicator of directional light attenuation in surface waters of the Mediterranean Sea]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2011. No. 5. P. 14–29.

Man'kovskii V. I., Zemlyanaya L. A. Svyaz' glubiny vidimosti belogo diska s pokazatelem oslableniya sveta dlya vod Chernogo morya [Connection of visibility depth of a white disk with the indicator of light attenuation for waters in the Black Sea]. *Kompleksnye okeanograficheskie issled. Chernogo morya* [Complex oceanographic research of Black Sea]. Sevastopol': MGI AN USSR, 1989. P. 82–85.

Man'kovskii V. I., Man'kovskaya E. V. Ispol'zovanie bioopticheskikh svyazei dlya opredeleniya kharakteristik sostoyaniya morskoi srede pri provedenii opticheskogo monitoringa v Chernom more s primeneniem prozrachnomerov [Use of biooptical communications for determining the characteristics of marine environment condition when carrying out optical monitoring in the Black Sea with the use of transparency meter]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2008. No. 2. P. 37–45.

Matyushenko V. A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' gidroopticheskikh kharakteristik Belogo morya [Space-time variability of hydrooptical characteristics of the White Sea]. *Probl. izucheniya, ratsional'nogo ispol'z. i okhr. resursov Belogo morya: Mat. IX mezhd. konf. (Petrozavodsk, 11–14 okt. 2004 g.)* [Issues of study, rational use, and protection of the White Sea resources: Proceed. IX int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 11–14, 2004)]. Petrozavodsk, 2005. P. 215–223.

Matyushenko V. A., Lukin L. R., Khomenko G. D., Galerkin L. I. Pokazatel' oslableniya sveta i ego svyazi s gidrologicheskimi kharakteristikami i sodержaniem vzveshennogo veshchestva v vodakh Barentseva morya [An indicator of light attenuation and its connection with hydrological characteristics and suspended substance content in waters of the Barents Sea]. *Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issled. v Arktike* [System oceanologic studies in the Arctic]. Moscow: Nauchnyy mir, 2001. P. 432–442.

Matyushenko V. A., Popov I. K., Misyuchenko I. L. Prostranstvennoe raspredelenie pokazatelya oslableniya sveta v vodakh Karskogo morya [Spatial distribution of an indicator of light attenuation in waters of the Kara Sea]. *DAN* [Proceed. Acad. Sci.]. 1995. Vol. 342, no. 3. P. 403–406.

Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. G. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushi [Complex ecological classification of surface waters quality]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 62–76.

Optika okeana. T. 1. Fizicheskaya optika okeana [Ocean optics. Vol. 1. Physical ocean optics]. Moscow: Nauka, 1983. 372 p.

RD 52.24.387–2006. Massovaya kontsentratsiya fosfora obshchego v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom posle okisleniya persul'fatom kaliya [Mass concentration of total phosphorus in waters. Methodology of measurement by photometric method after oxidation with potassium persulfate]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2006. 31 p.

Selegei V. V. Teletskoe ozero: ocherki istorii [Lake Teletskoye: essays of history]. Barnaul, 2011. Vol. 3. 244 p.

Selegei V. V., Dekhandskhyutter B., Klerks Ya., Vysotskii E. M., Perepelova T. I. Fiziko-geograficheskaya i geologicheskaya kharakteristika Teletskogo ozera [Physical and geological environment of Lake Teletskoye]. *Tr. Dep. geol. i mineral. Korolevskii Muzei Tsentral'noi Afriki, Tervyuren, Bel'giya* [Proceed. Dept. Geol. Mineral. Royal Museum for Central Africa, Tervyuren, Belgium]. 2001. Vol. 105. 310 p.

Selegei V. V., Selegei T. S. Teletskoe ozero [Lake Teletskoye]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 142 p.

Shifrin K. S. Vvedenie v optiku okeana [Introduction to ocean optics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 278 p.

Sutorikhin I. A., Bukatyi V. I., Kharlamova N. F., Akulova O. B. Klimaticheskie usloviya i gidroopticheskie kharakteristiki presnovodnykh ozer Altayskogo kraja [Climatic conditions and hydrooptical characteristics of freshwater lakes of Altai Krai]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016. 162 p.

Betancur-Turizo S. P., González-Silvera A. G., Santamaría-Del-Ángel E., Millán-Núñez R., Millán-Núñez E., García-Nava H., Godínez V. M., Sánchez-Velasco L. Variability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California. *Open Journal of Marine Science*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 20–37. doi: 10.4236/ojms.2018.81002

Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369.

Coble P. G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of Ocean color. *Chemical Rev.* 2007. Vol. 107. P. 402–418.

Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 649 p. doi: 10.1017/CBO9781139168212

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances. *PhD Thesis, Dept. Analytical*

and Marine Chemistry, Göteborg University, Göteborg, Sweden. 1979. 200 p.

Shi L., Mao Z., Wu J., Liu M., Zhang Y., Wang Z. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu. *Water*. 2017. Vol. 9, iss. 5. 352 p. doi: 10.3390/w9050352

Slade W. H., Boss E. Spectral attenuation and back-scattering as indicators of average particle size. *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, no. 24. P. 7264–7277. doi: 10.1364/AO.54.007264

Thrane J. E., Hessen D. O., Anderson T. The absorption of light in lakes: negative impact of organic carbon on primary productivity. *Ecosystems*. 2014. Vol. 17, iss. 6. P. 1040–1052. doi: 10.1007/s10021-014-9776-2

Received November 29, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Акулова Ольга Борисовна**

научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, к. т. н.  
Институт водных и экологических проблем СО РАН  
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038  
эл. почта: Akulova8282@mail.ru  
тел.: (3852) 666501

### **Букатый Владимир Иванович**

главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, д. ф.-м. н., проф.  
Институт водных и экологических проблем СО РАН  
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038  
эл. почта: v.bukaty@mail.ru  
тел.: (3852) 666501

### **Марусин Константин Валерьевич**

научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики  
Институт водных и экологических проблем СО РАН  
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038  
эл. почта: kat@iwep.ru  
тел.: (3852) 666011

## CONTRIBUTORS:

### **Akulova, Olga**

Institute for Water and Environmental Problems,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia  
e-mail: Akulova8282@mail.ru  
tel.: (3852) 666501

### **Bukaty, Vladimir**

Institute for Water and Environmental Problems,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia  
e-mail: v.bukaty@mail.ru  
tel.: (3852) 666501

### **Marusin, Konstantin**

Institute for Water and Environmental Problems,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia  
e-mail: kat@iwep.ru  
tel.: (3852) 666011

УДК 551.482.213 + 528.8.04

## ATMOSPHERIC COLUMNAR CO<sub>2</sub> ENHANCEMENT OVER *E. HUXLEYI* BLOOMS: CASE STUDIES IN THE NORTH ATLANTIC AND ARCTIC WATERS

**E. A. Morozov, D. V. Kondrik, S. S. Chepikova, D. V. Pozdnyakov**

*Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia*

Blooms of a coccolithophore *E. huxleyi* are generally huge, occur annually and in the oceans of both Hemispheres. As a calcifying algal species, *E. huxleyi* is known to enhance the partial pressure of dissolved CO<sub>2</sub> in the surface ocean, thus reducing its ability to absorb atmospheric CO<sub>2</sub>. Here we report on the results of our satellite study of CO<sub>2</sub> enhancement in the atmospheric column over *E. huxleyi* blooms in the North, Greenland, Iceland and Barents seas. The study is based on OCO-2 and wind force and direction data, and *E. huxleyi* bloom masks developed by us earlier. Eight case studies are discussed herein relating to the time period 2015–2018. The results obtained are strongly indicative that, indeed, the phenomenon of *E. huxleyi* blooms noticeably affects the carbon fluxes between the atmosphere and the surface ocean: the quantified enhancement of CO<sub>2</sub> content in the atmospheric column over the bloom area in five out of eight case studies proved to be in the range of 0.6–3.0 ppm. It is also shown that the magnitude of CO<sub>2</sub> enhancement in the atmospheric column is significantly controlled by air advection in the boundary layer.

**Key words:** satellite remote sensing; OCO-2 data; enhancement of atmospheric columnar CO<sub>2</sub> content over *E. huxleyi* blooms in Subarctic and Arctic seas; *Emiliana huxleyi*; wind and atmospheric advection.

### **Е. А. Морозов, Д. В. Кондрик, С. С. Чепикова, Д. В. Поздняков. УВЕЛИЧЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СО<sub>2</sub> В АТМОСФЕРНОМ СТОЛБЕ НАД ОБЛАСТЬЮ ЦВЕТЕНИЯ *E. HUXLEYI*: КОНКРЕТНЫЕ СЛУЧАИ В ВОДАХ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ И АРКТИКИ**

В этой краткой статье сообщается о результатах спутниковых исследований по увеличению содержания СО<sub>2</sub> в атмосферном столбе над цветениями *E. huxleyi* в Северном, Гренландском, Исландском и Баренцевом морях. Исследование базируется на данных космической станции ОСО-2 по содержанию СО<sub>2</sub> в атмосферном столбе, на спутниковых данных о силе и направлении приводного ветра, с использованием ранее нами разработанных масок цветений *E. huxleyi*. Всего было выявлено и исследовано восемь конкретных случаев за период с 2015 по 2018 гг., когда траектория пролета станции ОСО-2 пролегла по области цветения и выходила за ее пределы, что позволяло оценивать влияние цветения *E. huxleyi* на содержание СО<sub>2</sub> в атмосферном столбе. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о влиянии исследуемого явления на потоки углерода на границе раздела «атмосфера-океан». В пяти случаях из восьми увеличение СО<sub>2</sub> в атмосферном столбе над областью цветения *E. huxleyi* оказывалось в диапазоне 0,6–3,0 ppm. Выяснено, что

конкретная величина увеличения в некоторых случаях существенно зависит от адвекции воздушных масс в приграничном слое.

**Ключевые слова:** спутниковое дистанционное зондирование; данные OCO-2; увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосферном столбе над цветениями *E. huxleyi* в морях субарктической Атлантики и Арктики; *Emiliana huxleyi*; ветер и адвекция воздушных масс.

## Introduction

Among marine biosystems, coccolithophores (class Prymnesiophyceae) are the most productive calcite-producing organisms in the world's oceans [Thierstein, Young, 2013]. Dissolved carbon dioxide of atmospheric origin interacts with dissolved calcite with the formation of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Ca<sup>+2</sup>. Thus, any increase in the partial pressure of atmospheric CO<sub>2</sub> leads to a shift between the marine suspended organic and inorganic carbon. This, in turn, is bound to affect the carbon cycle in the atmosphere – ocean surface balance.

In addition to the production of particulate calcite, coccolithophores are capable of increasing dissolved CO<sub>2</sub> partial pressure within their blooming areas [Holligan et al., 1993; Kondrik et al., 2018].

Conjointly, these two mechanisms affect the carbon balance in surface ocean and tend to weaken marine carbon sinks, which has far-reaching consequences in terms of planetary climate change [IPCC, 2014].

Within the coccolithophore group, *E. huxleyi* is the most widespread species in the world's oceans [Westbroek et al., 1985; Moore et al., 2012]. It forms gigantic blooms with a surface of several thousand square kilometers [Kondrik et al., 2017], but sometimes exceeding one million square kilometers [Balch et al., 2014].

The aforementioned *E. huxleyi* bloom-driven enhancement of dissolved CO<sub>2</sub> partial pressure can reduce, nullify or even reverse the flux of CO<sub>2</sub> at the atmosphere-ocean interface. Indeed, Shutler et al. [2013] report on an average reduction in the monthly air-sea CO<sub>2</sub> flux by about 55 % across the marine tracts encompassing extensive *E. huxleyi* blooms in the North Atlantic, whereas the maximum reduction over the time period 1998–2007 was registered at 155 %.

Here we present our results on several case studies in the North, Iceland, Greenland and Barents seas. The study was designed to quantify the atmospheric columnar CO<sub>2</sub> over *E. huxleyi* blooms based on remote sensing data from the Orbiting Carbon Observatory OCO-2 that was put into orbit in 2014 to study CO<sub>2</sub> concentration and spatio-temporal distribution in the Earth's atmosphere

[Crisp, 2015]. The areas targeted in the above seas were identified in advance making use of *E. huxleyi* bloom masks developed on the basis of ocean color data from the ocean-colour climate-change initiative OC CCI data archive [Sathyendranath, Krasemann, 2014].

## Methodology

Previously, based on the developed bloom masking technology, i. e. the methodology of *E. huxleyi* bloom detection and contouring, the 1998–2018 time series of blooms of this alga were obtained for the Subarctic Atlantic and Arctic Seas [Kondrik et al., 2019; Selyuzhenok et al., 2019]. For the revealed locations of *E. huxleyi* blooms, the 2015–2018 OCO-2 data were subjected to sieve analysis in order to ascertain the cases of OCO-2 footprint trajectory crossing both the bloom area and adjoining bloom-free waters. The identified situations were further analyzed as case studies in order to investigate on a quantitative basis if there was any impact of *E. huxleyi* bloom areas on XCO<sub>2</sub> registered by OCO-2. Thus, to assess the impact, XCO<sub>2</sub> values registered along the OCO-2 footprint both over the bloom area and beyond it (either prior to reaching the bloom area or after leaving it) were compared. The resultant change in XCO<sub>2</sub>, i. e. ΔXCO<sub>2</sub>, was considered as a measure of the *E. huxleyi* bloom impact on the CO<sub>2</sub> exchange at the atmosphere-sea water interface, and hence, of the change in the CO<sub>2</sub> atmospheric columnar content.

All case studies also included the analysis of above water surface wind force and direction over the bloom area in order to clarify the issue of air mass advection across the satellite footprint trajectory.

### Data sources

**Wind data.** 8-day averaged satellite data from Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) data <http://www.rmss.com/measurements/wind/> were employed for the time period prior to 2016 (<http://www.rems.com/measurements/ccmp/>). CCMP gridded surface vector winds are generated through concatenation of satellite, moored buoy,

Change of XCO<sub>2</sub> (ppm) over *E. huxleyi* bloom areas in the Barents, Iceland, Greenland and North seas as recorded with the OCO-2 instrument within the time period 2015–2018

Case number	Sea	Start of 8-day time interval	XCO <sub>2</sub> over bloom	XCO <sub>2</sub> beyond bloom	ΔXCO <sub>2</sub>	Wind force (m/s) and direction
1	Barents	28.07.2015	393.6	393.0	0.6	4.6 E
2	South Iceland	12.07.2015	396.5	395.0	1.5	6.1 NNE
3	South Greenland	12.07.2015	397.0	394.0	3.0	3.0 WSW
4	South Iceland	24.05.2016	404.0	404.0	0	4.9 S
5	South Iceland	01.06.2016	404.0	402.0	2.0	3.3 ESE
6	North	17.05.2018	410.0	410.0	0	4.9 NE
7	North	18.06.2018	408.0	407.0	1.0	8.4 NW
8	North	26.06.2018	406.0	406.0	0	3.1 N

and simulated wind data. Thus conjoined, these mutually harmonized data qualify as Level-3 ocean vector wind analysis product. Through the involvement of improved and extended input data, the CCMP product was updated up to the CCMP V2.0 data set that is reachable at the Remote Sensing Systems (RSS) portal. This updated data set combines RSS-7 V. 7 radiometer wind speeds, QuikSCAT and ASCAT scatterometer wind vectors, wind speed actually measured from moored buoys, and ERA-Interim wind spatial distribution simulated with the Variational Analysis Method (VAM). The resultant product is four maps at a daily temporal and 0.25° spatial resolution.

In the case of the North Sea 2018, CCMP are unavailable, and in their stead ASCAT data, version 2.1 were exploited (<http://www.remss.com/missions/ascats/>). To better harmonize scatterometric and radiometric wind measurements, the ASCAT data were generated with the use of a new Geophysical Model Function, C-2015.

Thus, the wind vectors that are laid upon the maps illustrating our case studies represent 8-day wind force and direction averages specifically over the areas of *E. huxleyi* blooms.

**Atmospheric CO<sub>2</sub> content.** The column averaged dry air mole fraction, XCO<sub>2</sub> is defined as the ratio of “the altitude-dependent CO<sub>2</sub> number density integrated over the atmospheric column and the column abundance of dry air” [Crisp, 2015].

Having a 16-day ground-track repeat cycle, OCO-2 yields XCO<sub>2</sub> values with single-sounding random errors in the range of 0.5–1 ppm at solar zenith angles up to 70°, and at the spatial resolution of 3 km<sup>2</sup> in nadir, i. e. 1.25 km in width and ~2.4 km in length, which corresponds to a ~1.8 mrad instantaneous field of view and 3 Hz sampling. In 2018, the OCO-2 data processing algorithms were improved at NASA, and the current and retrospective products (L1B/L2 Version 8 and L2LiteFileVersion 9; October 10, 2018) were released ([\[docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/OCO/OCO2\\\_DUG.V9.pdf\]\(https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/OCO/OCO2\_DUG.V9.pdf\)\).](https://</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

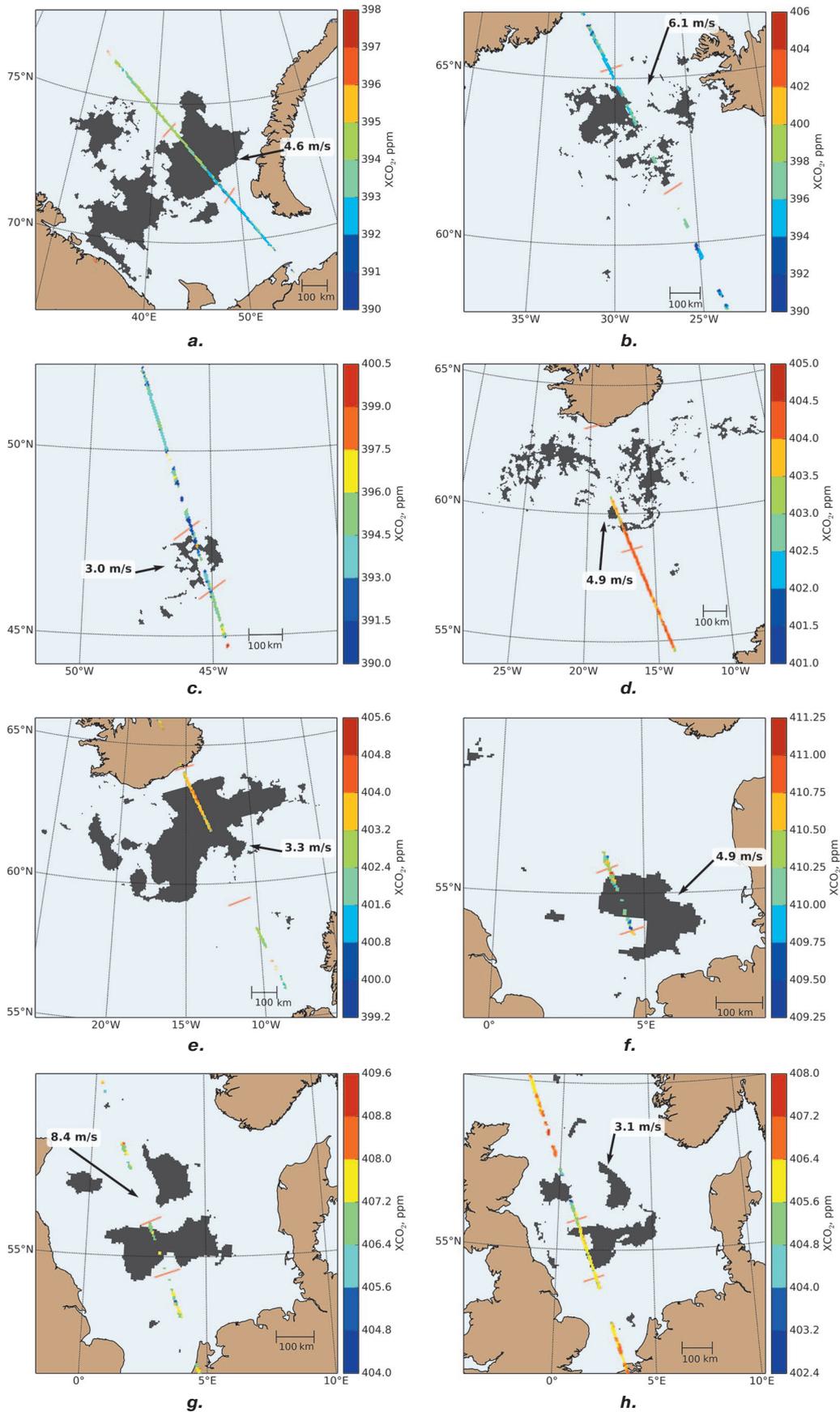
Only high quality data (i. e. unflagged data) were employed in our case studies. 8-day averaging of XCO<sub>2</sub> data was implemented in this study.

***E. huxleyi* bloom masking.** The 1998–2018 time series of *E. huxleyi* blooms in the Subarctic Atlantic and Arctic oceans was retrieved from Ocean Color Climate Change Initiative (OC CCI) data through the analysis of spectra of remote sensing reflectance,  $R_{rs}(\lambda)$ . The methodology is described in detail in [Kondrik et al., 2017, 2019]. Concisely, a typical  $R_{rs}$  spectrum from a *E. huxleyi* bloom exhibits a maximum at  $\lambda = \sim 490$  nm at the late stage of its development, when the surface water is predominantly populated by coccoliths whereas *E. huxleyi* cells have already mostly died off. Accurate delineation of *E. huxleyi* blooms was based on fulfillment of the requirement that the spectral values of  $R_{rs}$  (sr<sup>-1</sup>) in the OC CCI standard spectral channels exceed the following statistically established thresholds: 0.001 at 412 nm, 0.008 at 443 nm, 0.01 at 490 nm, 0.008 at 510 nm, and ~ 0 at 670 nm. On this basis, masks of *E. huxleyi* blooms were plotted for the target Subarctic and Arctic seas to restore the chronicle of spatio-temporal variations of the bloom areas between 1998 and 2018.

## Results and discussion

Here we present the results of eight satellite-based case studies from the Barents, Iceland, Greenland and North seas (Table, Fig., a–h). Note that red lines show the limits of the beyond-bloom areas used in this study for assessing ΔXCO<sub>2</sub>; black arrows indicate the force and direction of wind over the bloom area; black areas are *E. huxleyi* blooms.

As the Table shows, in 5 cases (The Barents, South Iceland, South Greenland, North seas) OCO-2 registered an increment of XCO<sub>2</sub> over *E. huxleyi* bloom areas ranging between 0.6



OCO-2 footprint trajectory and along XCO<sub>2</sub> (ppm) track values: *a-h* are 1–8 Cases, respectively (see Table)

and 3.0 ppm. These numbers are fully consistent with the results we have obtained in the study of *E. huxleyi* -induced XCO<sub>2</sub> in the Black Sea as registered in 2016–2017.

However, in three cases (the South Iceland, and North seas), no XCO<sub>2</sub> enhancement was found. A combined OCO-2 and wind data analysis has shown that the explanation of the apparent absence of *E. huxleyi* blooming impact upon XCO<sub>2</sub> might reside in the effect of above water air mass advection. Indeed, for cases 4, 6, and 8 the meteorological and *E. huxleyi* blooming conditions were specific. In case 4 the blooming area was essentially inhomogeneous/fractionized, and the wind direction was southern, i. e. bringing air masses from the parts of the sea free of any *E. huxleyi* bloom influence.

In case 8 there were very similar conditions in terms of wind-driven advection of above-water air from marine tracts void of *E. huxleyi* blooming. It is also worth mentioning that the blooming area was also significantly fractionized.

A special consideration should be given to case 6. At first glance, it appears that the *E. huxleyi*-driven ΔXCO<sub>2</sub> signal should not be zero: the footprint trajectory traverses the bloom area, and the advected air comes from a large portion of bloom. However, the number of OCO-2 pixels within the bloom area is rather small, rendering the ΔXCO<sub>2</sub> retrievals insufficiently reliable.

## Concluding remarks

Produced in the reaction of calcification inside the cell of *E. huxleyi*, CO<sub>2</sub> becomes available for the reaction of photosynthesis with a result of a reduced uptake of dissolved CO<sub>2</sub> from ambient water. Thus, surface marine waters within the bloom of *E. huxleyi* turn out to be less CO<sub>2</sub> depleted. Moreover, the thus enhanced partial pressure of dissolved CO<sub>2</sub> can either nullify the flux of atmospheric CO<sub>2</sub> or even reverse it. This has been proven in shipborne surveys, and through spaceborne observations over the Black Sea: the enhancement of CO<sub>2</sub> content in the atmospheric column proved to be within 1–2 ppm.

The eight case studies conducted with the employment of OCO-2 satellite data and presented in this concise report have shown that the impact of *E. huxleyi* blooming phenomenon on the atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure over the North, Iceland, Greenland, and Barents seas proved to be of the same order of magnitude as over the Black Sea (0.6–3 ppm). It is also shown that the magnitude of CO<sub>2</sub> enhancement in the atmospheric column is significantly controlled by the air advection in the boundary layer.

Arguably, this might be an indication of some inherent property of *E. huxleyi*, and the obtained results on the increment of CO<sub>2</sub> in the atmospheric column over the blooms of this alga can be considered as representative of this phenomenon across the oceanic tracts, at least, in the Northern Hemisphere.

*We express our gratitude for the financial support of this study provided by the Russian Science Foundation (RSF) under the project number 17-17-01117.*

## References

- Balch W. M., Drapeau D. T., Bowler B. C., Lyczkowski E. R., Lubelczyk L. C., Painter S. C., Poulton A. J. Surface biological, chemical, and optical properties of the Patagonian Shelf coccolithophore bloom, the brightest waters of the Great Calcite Belt. *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59. P. 1715–1732. doi: 10.4319/llo.2014.59.5.1715
- Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2). *Proceedings of SPIE. Earth Observing Systems XX*, 960702(8 September 2015). 2015. Vol. 9607. doi: 10.1117/12.2187291
- Holligan P. M., Fernández E., Aiken J., Balch W. M., Boyd P., Burkill P. H., Van der Wal P. A biogeochemical study of the coccolithophore, *Emiliana huxleyi*, in the North Atlantic. *Global Biogeochemical Cycles*. 1993. Vol. 7, no. 4. P. 879–900. doi: 10.1029/93GB01731
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Core Writing Team, Pachauri R. K., Meyer L. A.* (Eds.). IPCC. Geneva, Switzerland, 2014. P. 151.
- Kondrik D. V., Kazakov E., Chepikova S., Pozdnyakov D. V. Prioritization of physical factors controlling *Emiliana huxleyi* blooms in subarctic and arctic seas: a multidimensional statistical approach. *Biogeosciences*. 2019 (submitted).
- Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Johannessen O. M. Satellite evidence that *E. huxleyi* phytoplankton blooms weaken marine carbon sinks. *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45, no. 2. P. 846–854. doi: 10.1002/2017GL076240.
- Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013). *Int. J. Remote Sens.* 2017. Vol. 38(22). P. 6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304
- Moore T., Dowel M. D., Franz B. A. Detection of coccolithophore blooms in ocean color imagery: A generalized approach for use with multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117. P. 249–263. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.001
- Sathyendranath S., Krasemann H. Climate Assessment Report: Ocean Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) – Phase One. *Technical Report, ESA OC-CCI*. 2014.

URL: <http://www.esa-oceancolour-cci.org/?q=documents> (accessed: 05.02.2019)

Selyuzhenok V., Kondrik D., Kazakov E., Pozdnyakov D. Bering Sea: A possible explanation to the extraordinary bloom outburst of *E. huxleyi* in the late 1990s – early 2000s. *Remote Sensing Letters*. 2019 (submitted).

Shutler J. D., Land P. E., Brown C. W., Findlay H. S., Donlon C. J., Medland M., Snooke R., Blackford J. C. Coccolithophore surface distributions in the North Atlantic and their modulation of the air-sea flux of CO<sub>2</sub> from 10 years of satellite Earth observation data. *Biogeosci-*

*ences*. 2013. Vol. 10. P. 2699–2709. doi: 10.5194/bg-10-2699-2013

Thierstein H., Young J. *Coccolithophores: from molecular processes to global impact*. Berlin: Springer, 2013. 565 p.

Westbroek P. E., De Vrind-De Jong W., Van der Wal P., Borman A. H., De Vrind J. P. M. Biopolymer-mediated calcium and manganese accumulations and biomineralization. *Geologieen Mijnbouw*. 1985. Vol. 64. P. 5–15.

Received February 05, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Морозов Евгений Андреевич**

старший научный сотрудник  
Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»  
14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034  
эл. почта: [evgeny.morozov@niersc.spb.ru](mailto:evgeny.morozov@niersc.spb.ru)

### **Кондрик Дмитрий Вячеславович**

научный сотрудник  
Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»  
14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034  
эл. почта: [dmitry.kondrik@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.kondrik@niersc.spb.ru)

### **Чепикова Светлана Сергеевна**

младший научный сотрудник  
Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»  
14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034  
эл. почта: [sveta.chepikova@niersc.spb.ru](mailto:sveta.chepikova@niersc.spb.ru)

### **Поздняков Дмитрий Викторович**

заместитель директора по науке, руководитель группы водных экосистем, д. ф.-м. н., проф.  
Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»  
14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034  
эл. почта: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)

## CONTRIBUTORS:

### **Morozov, Evgenii**

Scientific foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”  
14<sup>th</sup> Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034  
St. Petersburg, Russia  
e-mail: [evgeny.morozov@niersc.spb.ru](mailto:evgeny.morozov@niersc.spb.ru)

### **Kondrik, Dmitrii**

Scientific foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”  
14<sup>th</sup> Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034  
St. Petersburg, Russia  
e-mail: [dmitry.kondrik@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.kondrik@niersc.spb.ru)

### **Chepikova, Svetlana**

Scientific foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”  
14<sup>th</sup> Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034  
St. Petersburg, Russia  
e-mail: [sveta.chepikova@niersc.spb.ru](mailto:sveta.chepikova@niersc.spb.ru)

### **Pozdnyakov, Dmitry**

Scientific foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”  
14<sup>th</sup> Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034  
St. Petersburg, Russia  
e-mail: [dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru](mailto:dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru)

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 624.131.41

### **ВЛИЯНИЕ СТОКОВ ГОРНО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕРНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

**В. А. Даувальтер**

*Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*

Проведены исследования химического состава донных отложений, в том числе ртути, озер Мурманской области, подверженных влиянию стоков предприятий горно-перерабатывающей промышленности. Установлено, что этот высокотоксичный и опасный для экосистемы озера халькофильный металл поступает в результате деятельности предприятий апатитонепелинового и медно-никелевого производств. В вертикальном распределении ртути в донных отложениях станций, расположенных близко к акватории поступления стоков разработки апатитонепелиновых месторождений, отмечается приповерхностный максимум на глубинах от 7 до 14 см колонок седиментов от 0,6 до 2,3 мкг/г, что в десятки раз больше среднего фонового содержания (0,044 мкг/г). Эти значения были на порядок выше нормативных показателей ISQG и PEL для Hg, разработанных Министерством окружающей среды Канады. Акватория плеса Большая Имандра относится к третьему классу загрязнения согласно классификации Норвежского управления по борьбе с загрязнением. Содержание Hg в поверхностном 1-см слое донных отложений находится в широком диапазоне от 0,018 до 1,000 мкг/г, и максимальные концентрации ртути приурочены к акваториям поступления стоков апатитонепелинового и медно-никелевого производств.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** донные отложения; ртуть; тяжелые металлы; озеро Имандра; загрязнение.

#### **V. A. Dauvalter. THE EFFECT OF MINING AND ORE PROCESSING EFFLUENTS ON MERCURY CONTENT IN ARCTIC LAKE SEDIMENTS**

The chemical composition, including mercury, of sediments in lakes of the Murmansk Region exposed to pollution by effluents from the mining industry was studied. It was found that the highly toxic and hazardous for the lake ecosystem chalcophile Hg comes from the activities of apatite-nepheline and copper-nickel mines and mills. In the vertical

distribution of Hg in the sediments at the stations situated near the waterbodies receiving effluents from apatite-nepheline mining, there is a near-surface maximum at sediment core depths of 7 to 14 cm amounting to 0.6 to 2.3  $\mu\text{g/g}$ , which is ten times more than the average background content (0.044  $\mu\text{g/g}$ ). These values were an order of magnitude higher than the ISQG and PEL standards for Hg developed by the Canadian Council of Ministers of the Environment. The Bolshaya Imandra water area is classified as “markedly polluted” (class III) according to the Norwegian Pollution Control Authority. Hg content in the top 1-cm sediment layer varies widely from 0.018 to 1.000  $\mu\text{g/g}$ , and the highest mercury concentrations are found in the areas receiving effluents from the apatite-nepheline and copper-nickel industry.

**Key words:** sediments; mercury; heavy metals; Lake Imandra; pollution.

## Введение

Евро-Арктическая зона России, в том числе Мурманская область, обладает уникальными минерально-сырьевыми ресурсами. На территории Мурманской области находятся крупнейшие в стране горнодобывающие, горно-перерабатывающие и горно-металлургические предприятия, которые ежегодно извлекают на поверхность земли миллионы тонн горных пород, но при этом выбрасывают в атмосферу и сбрасывают в водоемы и водотоки тысячи тонн загрязняющих веществ, в том числе высокотоксичных соединений металлов и органических загрязнителей. Среди загрязняющих веществ чрезвычайно опасными для природы и человека являются тяжелые металлы (ТМ), в первую очередь высокотоксичные халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As), способные мигрировать в воздушной и водной среде на значительные расстояния благодаря своим внутренним и внешним геохимическим особенностям (например, относительно низкой температуре плавления, большой способности образовывать металлоорганические комплексы и т. д.) [Даувальтер, Кашулин, 2015]. Эти элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов [Расуна, Расуна, 2001, 2002].

Наиболее опасной из вышеназванного перечня халькофильных элементов является ртуть, которая относится к неэссенциальным элементам с высокой степенью токсичности для живых организмов [Моисеенко и др., 2006; Моисеенко, Гашкина, 2016]. Она обладает способностью к высокой биоаккумуляции, возрастающей по трофической цепи экосистем, токсическими и канцерогенными свойствами [Мур, Рамамурти, 1987; Swain et al., 1992; Friedmann et al., 2002; Gochfeld, 2003]. Повышенные концентрации Hg в водных экосистемах могут регистрироваться в течение длительного времени и при включении в пищевую цепь способны нарушать воспроизводство организмов,

находящихся на вершине трофической пирамиды [UNEP..., 2002; Scheulhammer et al., 2007]. Водные системы являются коллекторами загрязняющих веществ, выпадающих на поверхность Земли. Hg мигрирует в водоемы в двух основных фазовых состояниях – в растворенном и взвешенном. Наиболее значимые химические формы в водных экосистемах – это элементарная ртуть ( $\text{Hg}^0$ ), неорганическая ртуть ( $\text{Hg}^{2+}$ ), монометилртуть ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) и диметилртуть ( $\text{CH}_3\text{HgCH}_3$ ). Адсорбентами и аккумуляторами Hg являются взвешенные в воде вещества и донные отложения (ДО) водоемов. Неорганические соединения металла, поступающие в водные экосистемы, быстро попадают в ДО в силу высокой сорбционной способности мелкодисперсных взвешенных в воде частиц, оседающих на дно водоемов и образующих ДО [Mason et al., 1993; Le Roux et al., 2001]. Однако ДО не представляют собой депо бесконечно длительного хранения Hg. Металл из ДО способен вновь поступать в водные массы, перейдя в металлоорганическую форму в результате бактериального метилирования и вовлечения в биогеохимический цикл [Covelli et al., 1999; Merritt, Amirbahman, 2007]. Распределение Hg между водными массами и ДО, а также переход неорганических соединений в металлоорганические и обратно зависит от многих морфометрических, гидродинамических, физико-химических и биологических параметров водоема [Suchanek et al., 1998; Waldron et al., 2000; Bonzongo et al., 2006; Hissler, Probst, 2006].

В глобальный круговорот ртути к настоящему времени вовлечено 3–7 тыс. т металла, из которых более половины приходится на антропогенные источники [Lamborg et al., 2002; Mason et al., 2003; Selin et al., 2007]. В отличие от других ТМ ртуть, в силу особых физико-химических свойств, способна перемещаться в атмосфере на тысячи километров от источников эмиссии [Holmes et al., 2007]. После выпадения на земную поверхность пути миграции металла разнообразны. Часть из общего коли-

чества испаряется и вновь поступает в атмосферу. Часть металла при анаэробных условиях восстанавливается до малорастворимых в воде сульфидов и на длительное время выводится из круговорота. Часть выпавшей из атмосферы ртути образует комплексные соединения с фульво- и гуминовыми кислотами и в составе этих комплексов мигрирует в поверхностном стоке по водосборному бассейну, пока не достигнет водоема [Законнов и др., 2012]. На территории водосборного бассейна, особенно большого по площади, могут располагаться локальные источники поступления этого металла, к которым в первую очередь относятся предприятия, использующие Hg в технологических процессах, промышленные, жилищно-коммунальные и сельскохозяйственные объекты, использовавшие в прошлом металлоорганические фунгициды [АМАР/UNEP..., 2008]. Ввиду крайне низкого содержания в воде загрязнение ртутью можно выявить преимущественно на основе изучения ее содержания в ДО и рыбах [Мур, Рамамурти, 1987].

Озеро Имандра расположено на крайнем северо-западе европейской территории России. Котловина озера находится в глубокой тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря [Моисеенко и др., 2002]. Эта депрессия делит Мурманскую область на две части: западную (материковую) и восточную (полуостровную). Озеро Имандра – самый крупный водоем в Мурманской области и один из крупнейших в Заполярье. Антропогенные факторы, которые в последние годы по значимости становятся сопоставимыми с природными, влияют на экологическое состояние озера в результате непосредственного сброса сточных вод и неорганизованных стоков и вследствие глобальных изменений окружающей среды и климата. Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей вызвало развитие мощного индустриального комплекса на территории водосбора оз. Имандра, что привело к высокой антропогенной нагрузке на водоем. Среди основных производств выделяются следующие: горнодобывающей и перерабатывающей промышленности (АО «Апатит»), металлургической промышленности (цветная металлургия – ОАО «Североникель», черная металлургия – ОАО «Олкон» и ОАО «Ковдорский ГОК»), энергетического комплекса (каскад Нивских ГЭС, Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ), а также хозяйственно-бытовые стоки городов Оленегорск, Мончегорск, Кировск, Апатиты

и других населенных пунктов, расположенных на водосборе озера [Моисеенко и др., 2002].

Целью данной работы было исследование влияния стоков горно-перерабатывающих предприятий на содержание токсичных и опасных для живых организмов ТМ, в том числе и Hg, в ДО озер Имандра и Большой Вудъявр.

## Материалы и методы

Исследования оз. Имандра, в том числе и экологические, проводятся в течение последнего столетия с начала освоения территории Мурманской области. Масштабные исследования начались в 1920-е годы, и первое, довольно подробное, описание оз. Имандра дано Г. Д. Рихтером [1934] по результатам работы Имандрской экспедиции Географо-экономического научно-исследовательского института при ЛГУ в 1925–1927 гг. Детальные исследования состояния ДО оз. Имандра проводятся с момента организации ИППЭС КНЦ РАН в 1989 г. сотрудниками лаборатории водных экосистем. Подробная съемка озера, в том числе с отбором ДО, была проведена в середине 1990-х [Моисеенко и др., 2002] и в 2010–2012 гг. Детальные исследования содержания Hg в ДО (так же как и в органах и тканях рыб) стали возможными с начала 2000-х годов благодаря приобретению современного оборудования, и в настоящее время Hg определяется с использованием проточно-инжекционной ртутной системы Perkin-Elmer FIMS 100. При написании данной работы использовались результаты съемки озера 2010–2012 гг.

Для оценки современного экологического состояния оз. Имандра и изучения истории развития и загрязнения озера был исследован химический состав ДО. Образцы ДО брались отборником колонок открытого гравитационного типа, изготовленного из плексигласа (внутренний диаметр 44 мм), с автоматически закрывающейся диафрагмой [Skogheim, 1979]. Помимо Hg в ДО определялось содержание ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), а также Al и P. Методы отбора колонок ДО, пробоподготовки и химического анализа описаны ранее [Даувальтер, 1999, 2006, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2014, 2018; Даувальтер и др., 2015].

При выборе мест отбора колонок ДО основное внимание уделялось акваториям, куда непосредственно поступают сточные воды предприятий: комбината «Североникель» – Мончегуба, Оленегорского ГОКа – губа Куреньга, АО

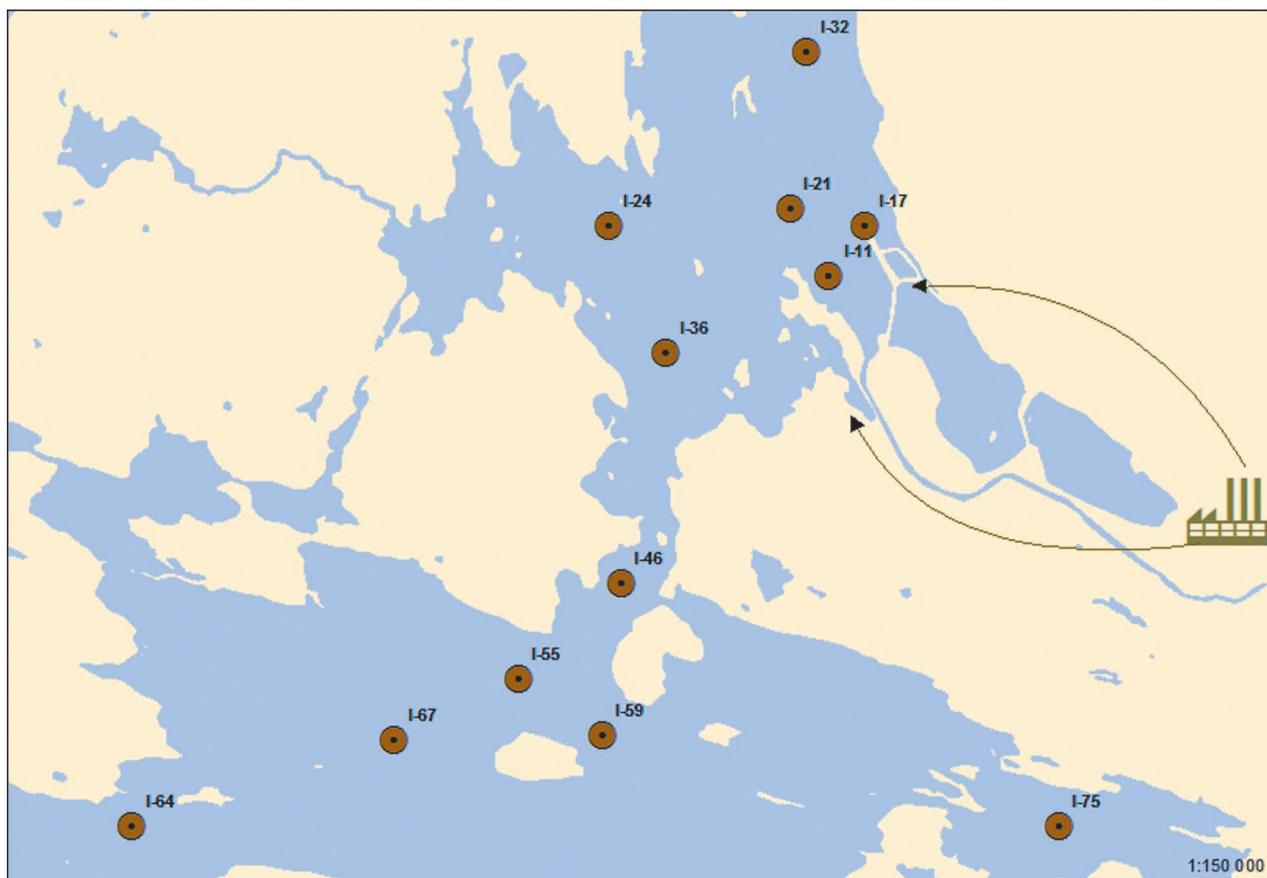


Рис. 1. Схема станций отбора проб ДО оз. Имандра в зоне влияния стоков АО «Апатит»

Fig. 1. The scheme of sediment sampling stations in the area of Lake Imandra exposed to pollution by effluents from Apatit JSC

«Апатит» – Белая губа и южная часть Большой Имандры, Африкандского рудоуправления – Зашеечная губа, Кольской АЭС – Молочная губа и восточная часть Бабинской Имандры. Акватория западной части Бабинской Имандры (губы Уполокша и Камка) рассматривалась как относительно незагрязненная, не подверженная непосредственному влиянию сточных вод, хотя водосбор этой части озера испытывает аэротехногенное загрязнение. Акватория влияния промышленных стоков АО «Апатит» подробно исследовалась в 2012 г., при этом были отобраны колонки ДО на 12 станциях (рис. 1).

## Результаты и обсуждение

### *Фоновые концентрации ртути в донных отложениях*

Фоновые концентрации элементов отражают геохимические особенности территории водосбора, позволяют получить количественные значения степени загрязнения водных объектов и определить аномалии с целью по-

исков месторождений полезных ископаемых [Tenhola, Lummaa, 1979]. Для установления интенсивности антропогенной нагрузки на озеро и степени его загрязнения необходимо знать природные концентрации элементов в ДО, которые существовали до любой деятельности на берегах озера или его водосбора и определяются, как правило, в нижних частях колонок ДО. Скорость осадконакопления в озерах Северной Фенноскандии, и Мурманской области в том числе, оценивалась равной примерно 1 мм в год, а диапазон находится в пределах от 0,3 до 1,25 мм/год в аэротехногенно загрязняемых озерах [Norton et al., 1992, 1996; Rognerud et al., 1993], 1,5–3 мм/год – в озерах, загрязняемых стоками промышленных предприятий, например, Куэтсьярви [Даувальтер, 2002; Dauvalter, 2003]. При исследовании состояния ДО оз. Имандра осуществлялся отбор колонок длиной 20–25 см. Следовательно, можно предположить, что в нижних слоях отобранных колонок ДО должно быть зафиксировано природное фоновое содержание элементов. Хотя в акваториях поступления большого количест-

Таблица 1. Средние (X), минимальные (Min) и максимальные (Max) фоновые концентрации Hg в ДО оз. Имандра, отобранных в 1990-е и 2010-е гг., скандинавских озер (CO [Håkanson, 1980]) и малых озер Мурманской области (MO, с дополнениями и изменениями по: [Даувальтер, 1999, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2014; Kashulin et al., 2017]). ОП – среднее содержание в осадочных породах (по: [Виноградов, 1962])  
 Table 1. Average (X), minimum (Min) and maximum (Max) background Hg concentrations in the Lake Imandra sediments collected in the 1990s and 2010s, scandinavian lakes (SL [Håkanson, 1980]) and small lakes of the Murmansk Region (MR, after: [Dauvalter, 1999, 2012; Dauvalter, Kashulin, 2014; Kashulin et al., 2017], revised and expanded), SR – average content in sedimentary rocks after: [Vinogradov, 1962]

ОП SR	CO SL	MO MR			Оз. Имандра 1990-е гг. Lake Imandra 1990s			Оз. Имандра 2010-е гг. Lake Imandra 2010s		
		X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max
0,4	0,12	0,035	0,003	0,112	0,071	0,003	0,190	0,044	0,005	0,103

ва взвешенного материала со стоками промышленных предприятий (главным образом рудников и обогатительных фабрик АО «Апатит») скорость осадконакопления значительно увеличилась, и длины некоторых колонок было недостаточно, чтобы отобрать ДО из фоновых доиндустриальных слоев. Поэтому при определении средних фоновых концентраций элементов в ДО оз. Имандра некоторые значения содержания не учитывались, т. к. были явно выше фоновых, например, на станциях, расположенных близко к месту поступления стоков АО «Апатит» (станции в Белой губе), комбината «Североникель» (станции в Монче-губе).

Фоновые концентрации Hg в ДО озера Имандра находятся в широком диапазоне (табл. 1), что отражает значительные вариации в геохимии водосборной территории (коренных и четвертичных пород, покрывающих их почв), скорости эрозионных процессов, модуля стока (водного, ионного и твердых веществ), т. е. всех условий формирования химического состава ДО озера. Средние значения фоновых концентраций Hg в ДО, отобранных в 2010-е годы, меньше в полтора раза по сравнению с образцами 1990-х гг. Вероятно, это связано с более современным и точным оборудованием для определения концентраций Hg в последние годы. Средние фоновые концентрации Hg в ДО 200 малых озер Мурманской области (табл. 1) немного меньше средних значений содержания в оз. Имандра, определенных в образцах 2010-х гг., и в 2 раза меньше, чем установленные в образцах 1990-х гг. В скандинавских озерах средние фоновые концентрации Hg в ДО больше, чем в оз. Имандра (табл. 1). Вероятно, объяснение этому лежит в усовершенствовании аналитического оборудования в последнее время по сравнению с 70–80-ми годами прошлого века, когда были проведены исследования скандинавских озер [Håkanson, Jansson, 1983; Johansson, 1988].

Материал, составляющий ДО озер, поступает из водной толщи – он либо приносится

с территории водосбора (аллохтонный), либо образуется в самом озере (автохтонный). В свою очередь ДО в результате дальнейших преобразований и диагенетических процессов образуют осадочные горные породы. Поэтому ДО водоемов (в том числе и оз. Имандра) можно рассматривать как связующее звено между гидросферой и литосферой [Даувальтер, 2012]. Академик А. П. Виноградов [1962] определил среднее содержание элементов в осадочных горных породах на основе анализа глинистых пород. Анализируемые нами ДО оз. Имандра и озер его водосбора по гранулометрическому составу представляют собой глинистые илы [Югай и др., 2012а, б], т. е. очень близки к глинам, поэтому содержание элементов в ДО водоемов разумно сопоставлять с их содержанием в осадочных горных породах. В осадочных горных породах концентрации Hg в среднем находятся в большем количестве, чем в фоновых слоях ДО оз. Имандра (табл. 1). Вероятно, это связано с тем, что ДО состоят не только из минеральных, но также и из органических веществ (в оз. Имандра до 30 %), которые, таким образом, разбавляют общее содержание элементов.

Для сравнения в табл. 2 приведены значения фоновое содержание Hg в ДО озер Фенноскандии и Северной Америки. Сравнивая результаты, можно сделать вывод, что фоновые значения Hg по результатам исследований других авторов находятся в хорошем соответствии с нашими данными для оз. Имандра. Наибольшее совпадение наблюдается с исследованиями бореальных озер Финляндии, Швеции и США.

Распределение величин фоновое содержание Hg в ДО различных плесов оз. Имандра показано в табл. 3. Высокие значения фоновое содержание Hg приурочены к Монче-губе, что связано с наличием залежей сульфидных Cu-Ni руд на водосборе этой части озера. Низкие значения приурочены к плесу Бабинская Имандра и губе Пиренга Большой Имандры. Как уже было сказано, при определении сред-

Таблица 2. Фоновые значения Hg (мкг/г) в ДО озер Фенноскандии и Северной Америки

Table 2. Background Hg values ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediments of the Fennoscandian and North American lakes

Страна Country	Озеро / Территория Lake / Area	Hg	Источник Source
Норвегия Norway	Оз. Тирифьорден Lake Tyrifjorden	0,050	Abry et al., 1982
Норвегия Norway	Оз. Мьесса Lake Mjosa	0,070–0,090	Rognerud, 1985
Швеция Sweden	Бореальные озера Boreal lakes	0,030–0,095	Håkanson, Jansson, 1983
Швеция Sweden	Бореальные озера Boreal lakes	0.050–0,120	Johansson, 1988
Финляндия Finland	Бореальные озера Boreal lakes	0,020–0,050	Rekolainen et al., 1986
США USA	Висконсин Wisconsin	0,040–0,070	Rada et al., 1989
США USA	Сев. Миннесота Northern Minnesota	0,030–0,060	Megar, 1986
Канада Canada	Онтарио Ontario	0,100	Douglas, 1986
США/Канада USA/Canada	Великие Американские озера Great Lakes	0,030–0,080	Mudroch et al., 1988

Таблица 3. Средние (X), минимальные (Min) и максимальные (Max) фоновые концентрации Hg (мкг/г) в ДО разных плесов оз. Имандра

Table 3. Average (X), minimum (Min) and maximum (Max) background Hg concentration ( $\mu\text{g/g}$ ) in sediments of different parts of Lake Imandra

Север Большой Имандры North of Bolshaya Imandra			Юг Большой Имандры South of Bolshaya Imandra			Йокостровская Имандра Yokostrovskaya Imandra			Бабинская Имандра Babinskaya Imandra		
X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max
0,063	0,014	0,110	0,020	0,005	0,040	0,050	0,022	0,088	0,034	0,010	0,058

них фоновых концентраций элементов в ДО оз. Имандра некоторые значения содержания не учитывались вследствие большой скорости осадконакопления, и эти значения были явно выше фоновых, например, на станциях, близко расположенных к месту поступления стоков АО «Апатит». Максимальные фоновые концентрации Hg приурочены к северной части Большой Имандры, а минимальные – к южной части этого плеса.

#### *Вертикальное распределение концентрации ртути в донных отложениях*

В результате исследований было установлено аномальное распределение концентраций Hg в ДО, объяснение которому автор попытался дать в настоящей публикации. В вертикальном распределении Hg в ДО исследуемых станций Большой Имандры (I-17, I-21, I-24, I-32, I-36), расположенных близко к акватории поступления стоков разработки апатитонелефиновых месторождений, четко отмечается приповерхностный максимум на разных глубинах от 7 до

14 см колонок ДО в зависимости от скорости осадконакопления (рис. 2). На станции I-32 в слое 7–9 см ДО зафиксировано максимальное содержание Hg – 2,3 мкг/г, что на два порядка больше средних фоновых концентраций этого элемента в ДО озер Мурманской области (0,035 мкг/г [Кашулин и др., 2013]). Кроме того, оно на порядок выше указанного во Временных рекомендациях по качеству пресноводных отложений (Interim freshwater sediment quality guidelines, ISQG) и почти в 5 раз больше Уровня вероятного эффекта (Probable effect level, PEL), разработанных Министерством окружающей среды Канады для Hg в ДО пресноводных водоемов [Sediment..., 2018]. Южная часть плеса Большая Имандра определяется как акватория с заметным (marked) загрязнением (класс III) согласно классификации Норвежского управления по борьбе с загрязнением [Molvær et al., 1997].

На 2–3 см ниже максимальных значений отмечается содержание Hg, сопоставимое со средними фоновыми концентрациями Hg в ДО озер Мурманской области. Сопоставление

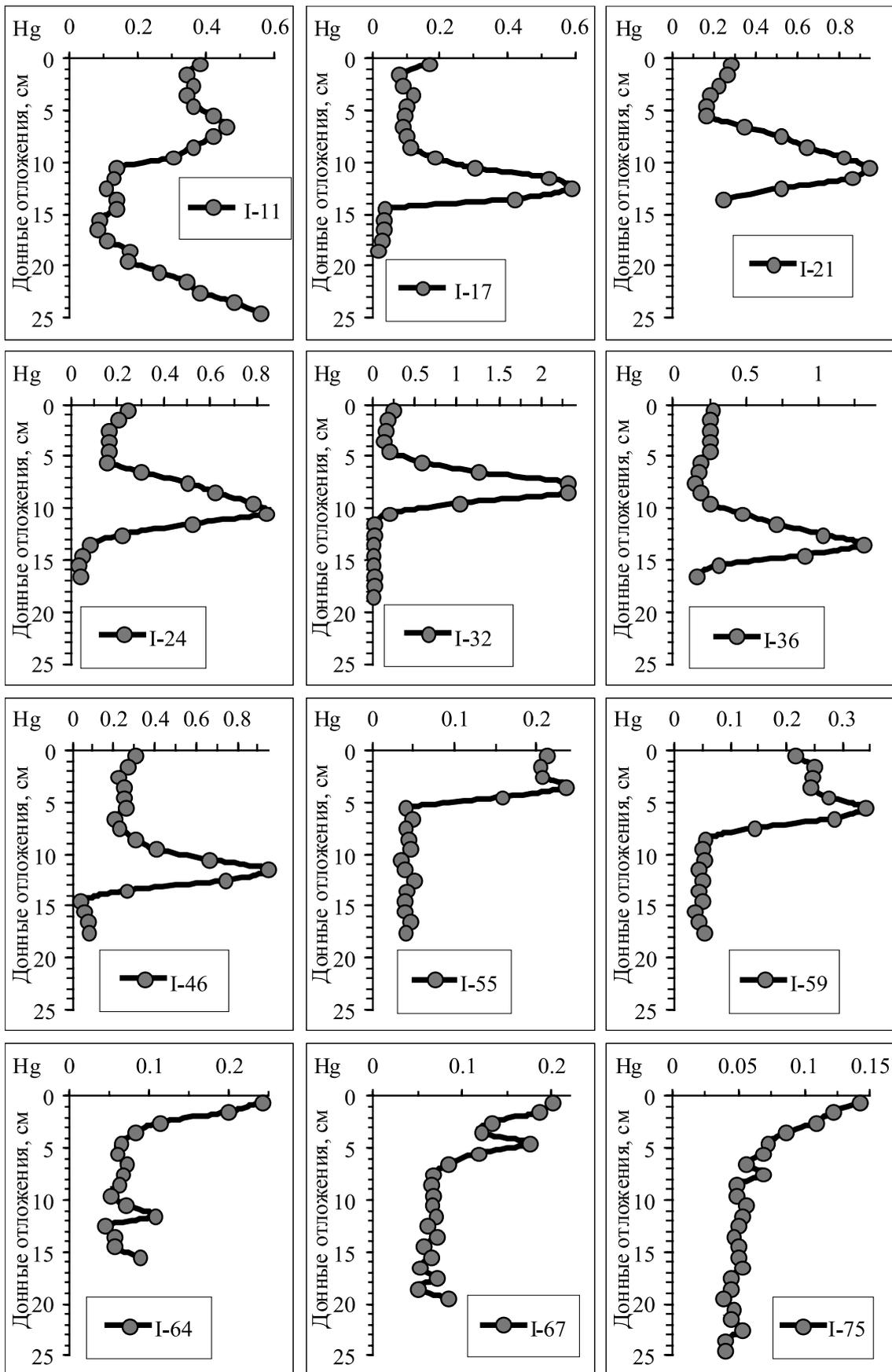


Рис. 2. Распределение Hg (мкг/г сух. веса) в толще ДО исследуемых станций оз. Имандра

Fig. 2. Vertical distribution of Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediments of the studied Lake Imandra stations

с вертикальными профилями других загрязняющих элементов (рис. 3) приводит к выводу, что увеличение содержания Hg в оз. Имандра по времени совпадает с началом поступления элементов со стоками АО «Апатит» (K, Na, Sr, P, Al, Ca) и комбината «Североникель» (Ni, Cu, Co и другие), но максимальные концентрации Hg фиксируются раньше, чем максимумы основных загрязняющих ТМ – Ni и Cu. Можно предположить, что максимальное поступление Hg происходило в 30–40-е годы XX столетия. Возможно, увеличение содержания Hg в ДО связано с тем, что при проведении горно-взрывных работ на первых этапах разработки апатитонелефиновых месторождений в капсулах-детонаторах использовалась гремучая ртуть (ртутная соль фульминовой (гремучей) кислоты  $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ ). Во время Великой Отечественной войны на базе комбината «Апатит» работал цех по изготовлению зажигательных фосфорных бомб, в которых в качестве капсуля-воспламенителя также использовалась гремучая ртуть. Уровень экологической безопасности, по понятным причинам, в то время был недостаточно высоким, поэтому можно предположить, что соединения ртути могли поступать в водоем.

Подобная закономерность в вертикальном распределении концентраций Hg в ДО отмечена и на станциях Йокостровской Имандры, лежащих близко к Йокостровскому проливу, I-46, I-55 и I-59 (рис. 2), но увеличение ее концентраций на этих станциях начинается немного позже, чем приоритетных загрязняющих ТМ – Ni и Cu. Максимальное содержание Hg отмечается на этих станциях в слоях 11–12, 3–4 и 5–6 см и составляет 0,95, 0,24 и 0,34 мкг/г соответственно. Так же как и на вышеописанных станциях Большой Имандры, на 2–3 см ниже этих максимальных уровней отмечаются значения, сопоставимые со средними фоновыми концентрациями Hg в ДО озер Мурманской области.

На других станциях Йокостровской Имандры – I-64, I-67 и I-75 – в вертикальном распределении концентраций Hg в ДО зафиксирован классический профиль, характерный для приоритетных загрязняющих ТМ (Ni и Cu), – в поверхностном слое отмечаются максимальные значения содержания (0,14–0,24 мкг/г), а самые глубокие слои ДО содержат Hg в количестве, сопоставимом со средними фоновыми концентрациями. Превышение фоновых концентраций Hg на этих станциях начинается с глубины 4–8 см (рис. 2), а вертикальные профили распределения Hg подобны распределению Ni и Cu.

В ДО оз. Большой Вудъявр, расположенного в Хибинах на водосборе оз. Имандра, получающего стоки разработки апатитонелефиновых

месторождений (с рудников и Первой апатитонелефиновой обогатительной фабрики АНОФ-I), максимальные значения содержания Hg зафиксированы в слое 7–10 см (0,94–1,11 мкг/г), что превышает фоновые значения в этом озере (0,05 мкг/г) в 20 раз (рис. 4). Резкое увеличение содержания Hg отмечается в слое 12–13 см, как и концентраций основных элементов, поступающих в озеро в составе стоков апатитонелефинового производства Ca и P. Максимальных концентраций Ca и P достигают немного раньше по времени осадконакопления (в слое 11–12 см), чем Hg (в слое 7–10 см). Совпадение профилей распределения Hg, Ca и P говорит в пользу того, что ртуть поступала в озеро в составе стоков апатитонелефинового производства. Далее по направлению к поверхности ДО происходит постепенное уменьшение содержания Hg, и в поверхностном 1-см слое оно достигает 0,36 мкг/г. Если допустить, что скорость осадконакопления оставалась равномерной за все время индустриального развития региона на водосборе оз. Большой Вудъявр, можно сделать заключение, что интенсивное загрязнение ртутью происходило в период увеличения добычи апатитонелефиновой руды и производства концентрата в 30–40-е годы XX столетия.

Распределение содержания Hg в толще ДО Монче-губы (рис. 5), в которую поступают стоки медно-никелевого производства, отличается от распределения этого металла в ДО южной части Большой Имандры и Большого Вудъявра (рис. 2 и 4), куда поступают стоки апатитонелефинового производства.

Значительное увеличение содержания Hg отмечается со слоя 5–6 см ДО Монче-губы, так же как и Ni и Cu, что свидетельствует о поступлении Hg в составе стоков комбината «Североникель», на котором перерабатываются медно-никелевые сульфидные руды, представленные такими минералами, как пентландит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ , халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , кобальтин  $(\text{Co}, \text{Ni})\text{AsS}$ , никелин  $\text{NiAs}$ , галенит  $\text{PbS}$ , сфалерит  $\text{ZnS}$ , хромит  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , минералами платиновой группы (арсениды, теллуриды, селениды) и другими [Gregurek et al., 1999]. Поэтому в выбросах и стоках комбината, помимо соединений S, Ni и Cu, присутствуют и сопутствующие им ТМ (Co, Zn, Pb, As, Cr, Cd, Hg), а также Fe, Se, Te, петрогенные щелочные и щелочноземельные металлы и другие элементы. В отличие от распределения Hg в ДО южной части Большой Имандры, где максимальные ее концентрации отмечались на глубине от 7 до 14 см колонок ДО в зависимости от скорости осадконакопления, максимальное содержание Hg в ДО Монче-губы (3 мкг/г, что в 70 раз больше среднего фонового содержания) отме-

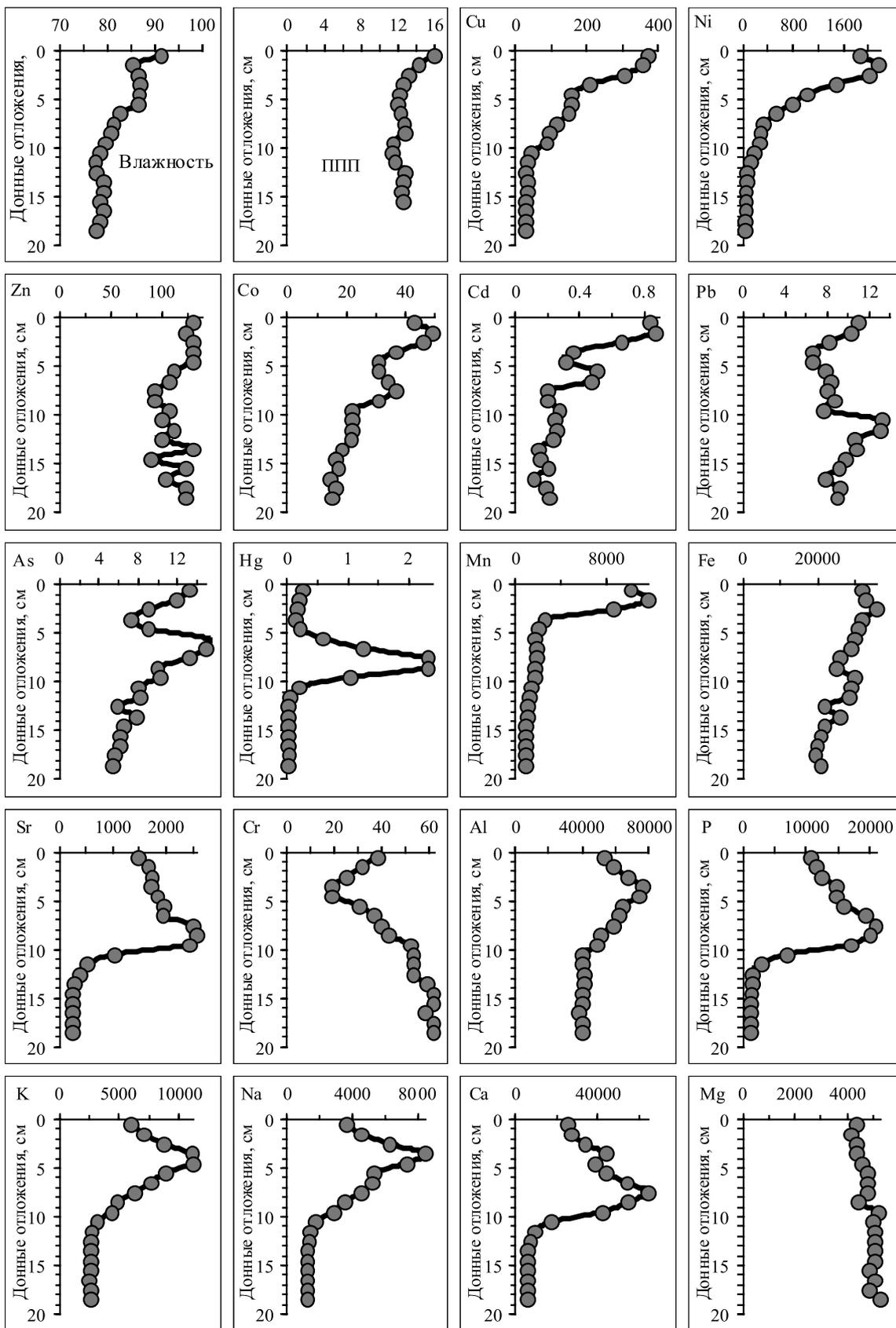


Рис. 3. Распределение влажности и потерь при прокаливании ППП (%) и концентраций исследуемых элементов (мкг/г) в толще ДО станции I-32 оз. Имандра

Fig. 3. Vertical distribution of humidity (%) and loss on ignition (LOI, %) and concentration of the studied elements ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediments of Lake Imandra station I-32

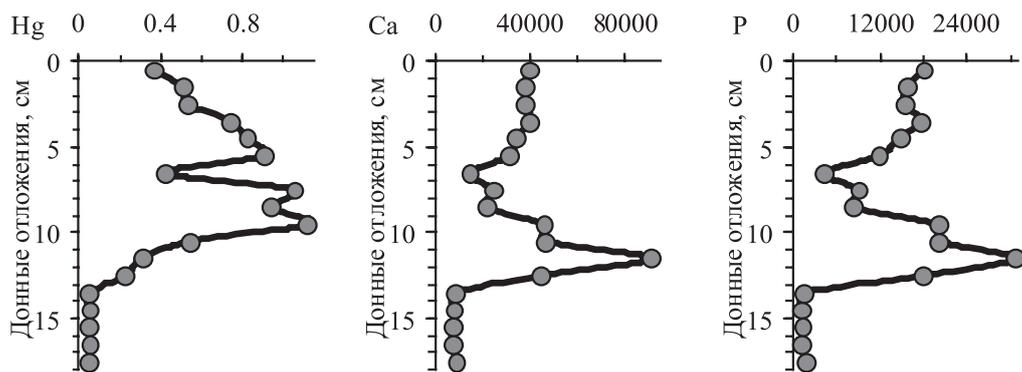


Рис. 4. Распределение Hg, Ca и P (мкг/г сух. веса) в толще ДО оз. Большой Вудъявр  
 Fig. 4. Vertical distribution of Hg, Ca and P ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediments of Lake Bolshoy Vudjavr

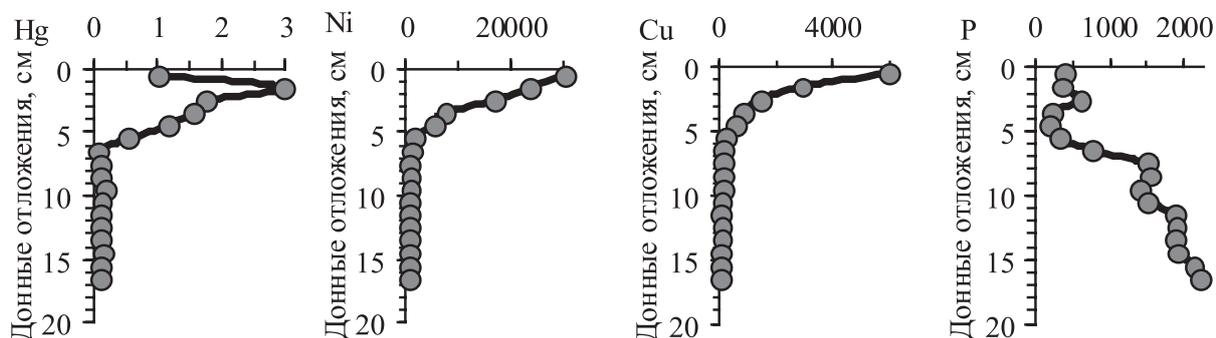


Рис. 5. Распределение Hg, Ni, Cu и P (мкг/г сух. веса) в толще ДО Монче-губы оз. Имандра  
 Fig. 5. Vertical distribution of Hg, Ni, Cu and P ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediments of the Monche Bay of Lake Imandra

чается на глубине 1–2 см, а в поверхностном слое 0–1 см происходит снижение ее содержания (до 1 мкг/г), как и в поверхностных слоях ДО в озерах Кумужье, Травяное, Сопчъявр, расположенных рядом с промплощадкой комбината «Североникель» (неопубликованные данные). Заметное повышение содержания большинства ТМ с глубины 6 см ДО, вероятно, связано с резким увеличением количества перерабатываемого сырья и выпуска продукции комбинатом «Североникель» – почти в 3 раза в 1960 г. после реконструкции комбината и начала переработки привозной норильской высокосернистой руды. Распределение P отличается от распределения всех исследуемых элементов – по направлению к поверхности ДО Монче-губы происходит постоянное уменьшение содержания, и в поверхностных слоях оно почти на порядок меньше, чем в глубоких фоновых слоях (рис. 5).

*Пространственное распределение концентрации ртути в поверхностном слое донных отложений*

Концентрации Hg в поверхностном слое ДО повышаются в ряду Бабинская Имандра –

Йокостровская Имандра – Большая Имандра (табл. 4, рис. 6). На исследуемых станциях оно находится в широком диапазоне от 0,018 до 1,00 мкг/г (табл. 4).

В Большой Имандре содержание Hg уменьшается по направлению распространения стоков одного из главных источников загрязнения озера Имандра этим металлом – комбината «Североникель». Около комбината отмечается максимальное содержание Hg, более чем в 20 раз превышающее фоновое содержание (рис. 6, табл. 4), и это свидетельствует, что именно сточные воды медно-никелевого производства являются основной причиной увеличения содержания Hg в ДО озера. В южной акватории Большой Имандры, в месте поступления стоков АО «Апатит», среднее содержание Hg снижается до 0,27 мкг/г, это в 5 раз больше фоновых значений. Ранее упоминалось, что в процессе апатитнефелинового производства при проведении взрывов использовалась гремучая ртуть и ее применение увеличило содержание Hg в ДО озера. Достаточно высокое содержание Hg в ДО южной части Большой Имандры говорит о том, что сточные воды АО «Апатит» также являются причиной этого увеличения.

Таблица 4. Среднее (X), минимальное (Min) и максимальное (Max) содержание Hg (мкг/г) в поверхностном слое (0–1 см) ДО различных плесов оз. Имандра

Table 4. Average (X), minimum (Min) and the maximum (Max) Hg concentration ( $\mu\text{g/g}$ ) in the surface sediment layer (0–1 cm) of different Lake Imandra parts

Плес озера Part of the lake	Hg		
	X	Min	Max
Большая Имандра Bolshaya Imandra	0,335	0,079	1,000
Монче-губа Monche Bay	0,795	0,590	1,000
Южная часть Б. Имандры South of Bolshaya Imandra	0,267	0,166	0,380
Йокостровская Имандра Yokostrovskaya Imandra	0,154	0,018	0,305
Бабинская Имандра Babinskaya Imandra	0,097	0,058	0,126

Уменьшение содержания Hg отмечается на станциях Йокостровской Имандры, где происходит разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, относительно незагрязненными водами рек, впадающих в Йокостровскую Имандру. Наименьшие концентрации в восточной части плеса отмечаются на станции I-75 (Тик-губа), которая лежит за пределами потока распространения загрязняющих веществ. Небольшое содержание Hg зафиксировано также и в поверхностном слое ДО станции I-17, что связано, вероятно, с плохими сорбционными способностями довольно крупнозернистых частиц ДО, накапливающихся вблизи места поступления взвешенного вещества от апатитонефелинового производства из хвостохранилища АНОФ-II. Минимальные значения содержания Hg на станциях западной части Йокостровской Имандры отмечаются в губах, которые лежат за пределами потока распространения загрязняющих веществ. Наименьшее содержание Hg в диапазоне от 0,05 (что сопоставимо с фоновым содержанием) до 0,13 мкг/г зафиксировано в поверхностном слое ДО Бабинской Имандры и западной части Йокостровской Имандры.

#### *Определение массы ртути, накопленной в донных отложениях*

По аналогии с проведенной ранее оценкой накопления тяжелых металлов в ДО оз. Имандра [Даувальтер и др., 2000] был проведен расчет массы Hg, накопленной в ДО озера за последние 80 лет деятельности предприятий горно-металлургического комплекса. Для этого использовались результаты исследований

химического состава колонок ДО оз. Имандра, отобранных в 2010-е годы (в том числе в Бабинской и Йокостровской Имандре [Даувальтер, Кашулин, 2013]). Мощность загрязненных ДО на большей части акватории озера в среднем составляет 10 см, увеличиваясь до 25 см вблизи места поступления стоков. Масса загрязненных ДО рассчитывалась для каждой зоны путем умножения объема на плотность ДО, которая в среднем принята равной  $1,15 \text{ г/см}^3$  ( $1,15 \text{ т/м}^3$  по: [Даувальтер и др., 2000]). Масса Hg на отдельных акваториях и плесах озера рассчитывалась умножением массы загрязненных ДО в этой зоне на средние (за вычетом фоновых значений) концентрации загрязняющего элемента во влажных ДО. Для этого концентрации элемента во влажных ДО рассчитывались путем умножения содержания в сухом состоянии на величины  $(1 - H_2O)$ , где  $H_2O$  – среднее значение влажности по отдельной колонке. Общая масса Hg в целом для озера определялась суммированием результатов по отдельным зонам.

В результате расчетов было установлено, что масса накопленной в ДО оз. Имандра ртути составляет более 2,2 т. Больше половины этого количества (около 1,3 т) сконцентрировано в южной части плеса Большая Имандра, а в северной части плеса – около полутонны. Таким образом, в плесе Большая Имандра в ДО находится более  $\frac{3}{4}$  от общего количества накопленного высокотоксичного металла. В Йокостровской и Бабинской Имандре собралось значительно меньшее количество Hg – 0,29 и 0,20 т соответственно. Такое распределение этого высокотоксичного металла, накопленного в ДО отдельных плесов озера, обусловлено расположением основных источников загрязнения – предприятий горно-металлургического комплекса, а основной вклад вносит, как выяснилось, разработка апатитонефелиновых месторождений, а не горно-металлургическая деятельность, как это можно было предполагать.

Для сравнения с полученными данными по аккумуляции Hg: за более чем 60-летний период деятельности предприятий горно-металлургического комплекса на территории водосбора в ДО оз. Имандра накоплено 4600, 960, 120, 250, 11 и 200 т Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Pb соответственно. 60–70 % накопленных Ni, Cu, Co, Cd и Zn приходится на северную часть озера (плес Большая Имандра), на Йокостровскую – 15–30 %, и только Pb в этих плесах представлен в одинаковых количествах. В восточной части озера (плес Бабинская Имандра) доля накопленных ТМ (от общего количества) находится в диапазоне 1–18 % (максимальное – для Zn) [Даувальтер и др., 2000].

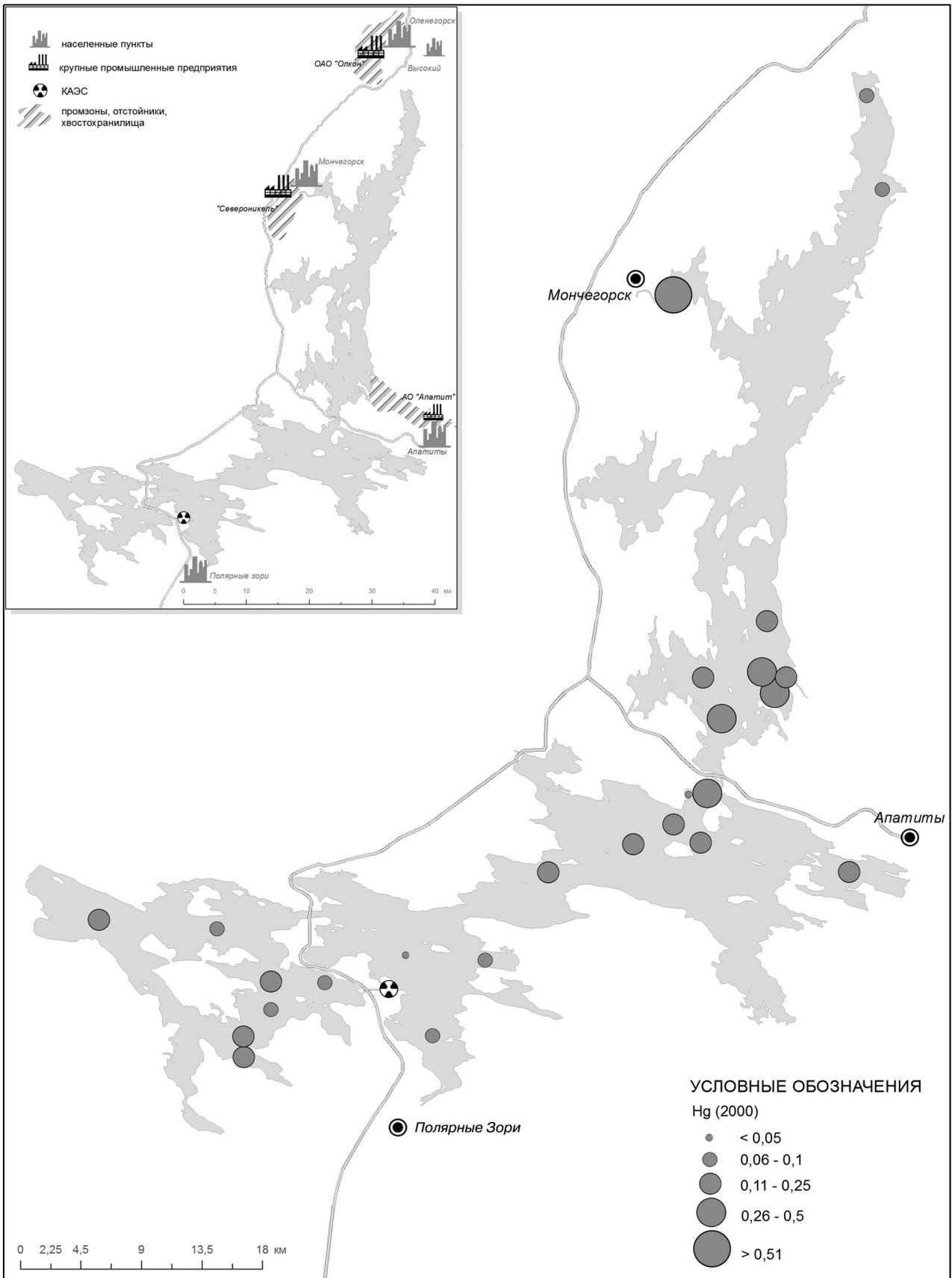


Рис. 6. Территориальное распределение значений Hg (в мкг/г) в поверхностном слое (0–1 см) ДО оз. Имандра  
 Fig. 6. The spatial distribution of Hg values ( $\mu\text{g/g}$ ) in the surface (0–1 cm) sediments of Lake Imandra

## Заключение

Таким образом, можно считать установленным, что высокотоксичный, опасный для экосистемы оз. Имандра халькофильный металл Hg поступает в водоем в результате деятельности предприятий апатитонелефинового и медно-никелевого производств. Максимальное содержание Hg в ДО оз. Имандра на два порядка больше средних фоновых концентраций в ДО озер Мурманской области, на порядок больше указанного во Временных рекомендациях по качеству пресноводных отложений и почти в 5 раз больше Уровня вероятного эффекта, разработанных Министерством окружающей среды Канады для Hg в ДО пресноводных водоемов [Sediment..., 2018], и определяется как заметное загрязнение (класс III) согласно классификации Норвежского управления по борьбе с загрязнением [Molvær et al., 1997]. Крупнейшим источником поступления Hg в озерно-речную систему озеро Большой Вудъявр – река Большая Белая – озеро Имандра является разработка апатитонелефиновых месторождений. При проведении горно-взрывных работ на первых этапах разработки в капсулах-детонаторах использовалась гремучая ртуть. Во время Великой Отечественной войны на базе комбината «Апатит» работал цех по изготовлению зажигательных фосфорных бомб, в которых в качестве капсуля-воспламенителя также использовалась гремучая ртуть. Другим крупным источником поступления Hg в оз. Имандра является комбинат «Североникель», на котором проводились горнопроходческие работы на рудниках и перерабатываются медно-никелевые сульфидные руды. В выбросах и стоках комбината, помимо соединений S, Ni и Cu, присутствуют и соединения других ТМ, в том числе и Hg. Есть еще несколько предположений относительно источников поступления Hg в озеро. Например, для освещения промышленных территорий рудников, обогатительных фабрик и других производств применяются ртутные лампы низкого и высокого давления, которые, как правило, не утилизируются, а выбрасываются на свалки или отвалы рудников. Ртуть содержится в медицинских термометрах (в одном термометре примерно 2 г Hg). До середины XX века она широко применялась в манометрах, для проведения химических анализов, например количественного определения аммиака (реактив Несслера), и других целей. Вплоть до 1970-х годов соединения Hg очень активно использовались в медицине, например: хлорид ртути (I) (каломель) – слабительное; меркузал и промеран – сильные мочегонные; хлорид

ртути (II), цианид ртути (II), амидохлорид ртути и желтый оксид ртути (II) – антисептики (в том числе в составе мазей), и т. д.

*Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0045 и частично поддержана из средств гранта РФФИ (18-05-60125).*

## Литература

Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 1999. 52 с.

Даувальтер В. А. Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия геогр. 2002. № 4. С. 65–73.

Даувальтер В. А. Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов. Мурманск: Изд-во Мурман. гос. техн. ун-та, 2006. 84 с.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурман. гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Долговременные изменения химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции // Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2013. № 3(16). С. 6–35.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области. В 3-х ч. Ч. 3: Донные отложения водоемов. Мурманск: Изд-во Мурман. гос. техн. ун-та, 2014. 214 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России. Мурманск: Изд-во Мурман. гос. техн. ун-та, 2015. 136 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Аккумуляция и миграция элементов в Арктических наземных и водных экосистемах в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель» // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 31–42. doi: 10.17076/lim744

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Даувальтер В. А., Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Сандимиров С. С. Накопление тяжелых металлов в оз. Имандра в условиях его промышленного загрязнения // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 3. С. 313–321.

Законнов В. В., Комов В. Т., Гремичих В. А., Касьянова В. В., Костров А. В. Роль седиментации в накоплении ртути в донных отложениях Горьковского и Чебоксарского водохранилищ // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем

водохранилищ. Ижевск: Изд. Пермьяков С. А., 2012. 90–92 с.

Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Кашулин А. Н. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П., Ильяшук Б. П., Ильяшук Е. А., Сандимиров С. С., Каган Л. Я., Вандыш О. И., Шаров А. Н., Шарова Ю. Н., Королева И. М. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Под ред. Т. И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 487 с.

Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.

Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. 2016. № 6. С. 495–504. doi: 10.7868/S0016752516060042

Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 288 с.

Рихтер Г. Д. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л.: Гостехиздат, 1934. 144 с.

Югай В. С., Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Гранулометрический и химический состав донных отложений озер Большой и Малый Вудъявр // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2012а. № 9. С. 369–372.

Югай В. С., Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Особенности формирования донных отложений озера Имандра в зоне воздействия сточных вод ОАО «Апатит» // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участ. Ч. I. Апатиты: КНЦ РАН, 2012б. С. 264–268.

Abry T., Skogheim O. K., Hongve D. Sedimentene i Tyrifjorden. Tungmetaller og dateringer. Tyrifjordundersøkelsen. Oslo: NIVA, Fagrapport Nr. 19. 1982.

AMAP/UNEP. Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment. Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemical Branch. 2008. 159 p.

Bonzongo J. C. J., Nemer B. W., Lyons W. B. Hydrologic controls on water chemistry and mercury biotransformation in a closed river system: The Carson River, Nevada // Appl. Geochem. 2006. Vol. 21. P. 1999–2009. doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.08.010

Covelli S., Faganeli J., Horvat M., Brambati A. Pore-water distribution and benthic flux measurements of mercury and methylmercury in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea) // Estuar. Coast. Shelf Sci. 1999. Vol. 48. P. 415–428. doi: 10.1006/ecss.1999.0466

Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monit. 2003. Vol. 5(2). P. 210–215. doi: 10.1039/b301144p

Douglas E. R. Sources of mercury contamination in the sediments of small headwater lakes in south-cen-

tral Ontario, Canada // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 1986. Vol. 15. P. 505–512. doi: 10.1007/BF01056562

Friedmann A. S., Costain K. E., MacLachy D. L., Stansley W., Washuta E. J. Effect of mercury on general and reproductive health of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) from Three Lakes in New Jersey // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2002. Vol. 52. P. 117–122. doi: 10.1006/eesa/2002.2165

Gochfeld M. Case of mercury exposure, bioavailability and absorption // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2003. Vol. 56. P. 174–179. doi: 10.1016/S0147-6513(03)00060-5

Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A., Reimann C., Stumpf E. F. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia // Miner. Petrol. 1999. Vol. 65. P. 87–111. doi: 10.1007/BF01161578

Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Research. 1980. Vol. 14, iss. 8. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8

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

Hissler C., Probst J. L. Chlor-alkali industrial contamination and riverine transport of mercury: Distribution and partitioning of mercury between water, suspended matter, and bottom sediment of the Thur River, France // Appl. Geochem. 2006. Vol. 21. P. 1837–1854. doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.08.002

Holmes C. D., Jacob D. J., Yang X. Global lifetime of elemental mercury against oxidation by atomic bromine in the free troposphere // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 33(20). L20808. doi: 10.1029/2006GL027176

Johansson K. Heavy metals in Swedish forest lakes – factors influencing the distribution in sediments. Doctoral thesis. Uppsala University, Sweden. 1988.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk region, Russia // J. Environ. Sci. Health Pt. A. 2017. Vol. 52, no. 9. P. 921–929. doi: 10.1080/10934529.2017.1318633

Lamborg C. H., Fitzgerald W. F., O'Dormel J., Torgersen T. A non-steady-state compartmental model of global scale mercury biogeochemistry with inter-hemispheric atmospheric gradients // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. Vol. 66. P. 1105–1118. doi: 10.1016/S0016-7037(01)00841-9

Le Roux S. M., Turner A., Millward G. E., Ebdon L., Appriou P. Partitioning of mercury onto suspended sediments in estuaries // J. Environ. Monit. 2001. Vol. 3. P. 37–42. doi: 10.1039/b007093i

Mason R. P., Fitzgerald W. F., Hurley J., Hanson A. K., Donaghay P. L., Sieburth J. M. Mercury biogeochemical cycling in a stratified estuary // Limnol. Oceanogr. 1993. Vol. 38. P. 1227–1241. doi: 10.4319/lo.1993.38.6.1227

Mason R. P., Laurier F. J. G., Wialin L., Sheu G. R. The role of ocean-atmosphere exchange in the global mercury cycle // Journal de Physique. 2003. Vol. 107. P. 835–838. doi: 10.1051/jp4:20030428

Megar S. A. Polluted precipitation and the geochronology of mercury deposition in lake sediments

of Northern Minnesota // *Water, Air, Soil Pollut.* 1986. Vol. 30. P. 411–419. doi: 10.1007/BF00305211

Merritt K. A., Amirbahman A. Mercury dynamics in sulfide-rich sediments: geochemical influence on contaminant mobilization within the Penobscot River estuary, Maine, USA // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. Vol. 71. P. 929–941. doi: 10.1016/j.gca.2006.10.012

Molvær J., Knutsen J., Magnusson J., Rygg B., Skei J., Sørensen J. Classification of environmental quality in fjords and coastal waters. A guide. Norwegian Pollution Control Authority. SFT TA-1467/1997, 1997.

Mudroch A., Sarazin L., Lomas T. Summary of surface and background concentrations of selected elements in the Great Lakes sediments // *Great Lakes Res.* 1988. Vol. 14, no. 2. P. 241–251. doi: 10.1016/S0380-1330(88)71553-1

Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G., Ludwig L. L., Vereault D. V., Traaen T. S. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.

Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment. Oslo: NIVA-Report 41/1996, 1996. 18 p.

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // *Environ. Rev.* 2001. Vol. 4. P. 269–298. doi: 10.1139/er-9-4-269

Pacyna J. M., Pacyna E. G. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995 // *Water, Air, and Soil Pollution.* 2002. Vol. 137. P. 143–165. doi: 10.1023/A:1015502430561

Rada R. G., Wiener J. G., Wintrey M. R., Powel D. E. Recent increases in atmospheric deposition of mercury to North Central Wisconsin lakes inferred from sediment analyses // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1989. Vol. 18. P. 175–181. doi: 10.1007/BF01056202

Rekolainen S., Verta M., Liehu A. The effect of airborne mercury and peatland drainage on sediment mercury content in some Finnish forest lakes. Helsinki: National Board of Water, 1986. P. 11–21.

Rognerud S. Kvikksolv i Mjosa's sedimenter. Oslo: NIVA-rapport 0-82105, 1985.

Rognerud S., Norton S. A., Dauvalter V. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between

Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p.

Scheulhammer A. M., Meyer M. W., Sandheinrich M. B., Murray M. W. Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals and fish // *Ambio.* 2007. Vol. 36. P. 12–18. doi: 10.1579/0044-7447(2007)36[12:EOEMOT]2.0.CO;2

Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life // Canadian Environmental Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2018 [Electronic resource]. URL: <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html> (accessed: 04.09.2018).

Selin N. E., Jacob D. J., Park R. J., Jantosca R. M., Strode S., Jaegle L., Jaffe D. Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury: Global constraints from observations // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D 02308. doi: 10.1029/2006JD007450

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As- NLH, No. 2, 1979. 7 p.

Suchanek T. H., Mullen I. H., Lamphere B. A., Richerson P. J., Woodmansee C. E., Slotton D. G., Hamer E. J., Woodward L. A. Redistribution of mercury from contaminated lake sediments of Clear Lake, California // *Water Air Soil Pollut.* 1998. Vol. 104. P. 77–102. doi: 10.1023/A:1004980026183

Swain E. B., Engstrom D. R., Brigham M. E., Henning T. A., Brezonic P. L. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America // *Science.* 1992. Vol. 257. P. 784–787. doi: 10.1126/science.257.5071.784

Tenholma M., Lummaa M. Regional distribution of zinc in lake sediments from eastern Finland // Symposium on Economic Geology, Dublin, Ireland, 26–29 August, 1979. P. 67–73.

UNEP, 2013. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. 42 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11401/GlobalMercury-Assessment2013.pdf?sequence=1&isAllowed=1> (accessed: 25.02.2019).

Waldron M. C., Colman J. A., Breault R. F. Distribution, hydrologic transport, and cycling of total mercury and methyl mercury in a contaminated river-reservoir-wetland system (Sudbury River, eastern Massachusetts) // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2000. Vol. 57. P. 1080–1091.

Поступила в редакцию 12.10.2018

## References

Dauval'ter V. A. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodnykh ob'ektakh Evropeiskoi Subarktiki (prirodookhrannye aspekty problemy) [The patterns of sedimentation in water bodies of the European Subarctic (environmental aspects of the problem)]: DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow, 1999. 52 p.

Dauval'ter V. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii subarkticheskogo ozera pod vliyaniem gornoi metallurgii [Chemical content of the bottom deposits of Subarctic lakes under the influence of mining metallurgy]. *Izv. AN. Ser. geograficheskaya* [Proceed. RAS. Geographical Ser.]. 2002. Vol. 4. P. 65–73.

Dauval'ter V. A. Issledovanie fizicheskogo i khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii pri otsenke ekologicheskogo sostoyaniya vodoemov [A study of the physical and chemical composition of sediments in assessing the ecological state of reservoirs]. Murmansk: Murm. gos. tekhn. un-t, 2006. 84 p.

Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of bottom sediments in lakes]. Murmansk: Murm. gos. tekhn. un-t, 2012. 242 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Dolgovremennye izmeneniya khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii ozera Imandra v zone vliyaniya stokov Kol'skoi atomnoi

elektrostantsii [Long-term changes in the chemical composition of the Lake Imandra sediments within the zone of waste water influence of the Kola Nuclear Power Plant.]. *Trudy KNC RAN. Priklad. ekol. Severa* [Proceed. Kola Sci. Centre RAS. Appl. Ecol. of the North]. 2013. No. 3(16). P. 6–35.

*Dauval'ter V. A., Kashulin N. A.* Geoekologiya ozer Murmanskoi oblasti. Ch. 3: Donnye otlozheniya vodoemov [Geoecology of the lakes of the Murmansk Region. Part 3: Lake sediments]. Murmansk: Murm. gos. tekhn. un-t, 2014. Vol. 3. 214 p.

*Dauval'ter V. A., Kashulin N. A.* Biogeokhimicheskie osobennosti raspredeleniya khal'kofil'nykh elementov (Hg, Cd, Pb, As) v vodoemakh Severa evropeiskoi chasti Rossii [Biogeochemical features of distribution of chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in reservoirs of the North of the European part of Russia]. Murmansk: Murm. gos. tekhn. un-t, 2015. 136 p.

*Dauval'ter V. A., Kashulin N. A.* Akkumulyatsiya i migratsiya elementov v Arkticheskikh nazemnykh i vodnykh ekosistemakh v zone vliyaniya vybrosov kombinata "Pechenganikel" [Accumulation and migration of chemical elements in the Arctic terrestrial and aquatic ecosystems in the emission influence zone of Pechenganickel Company]. *Tr. KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 31–42. doi: 10.17076/lim744

*Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B.* Tendentsii izmeneniya sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Severa Fennoskandii v poslednie stoletiya [Tendencies in the content change of heavy metals in lake sediments in Northern Fennoscandia over the last centuries]. *Tr. KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 9. P. 62–75. doi: 10.17076/lim40

*Dauval'ter V. A., Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Sandimirov S. S.* Nakoplenie tyazhelykh metallov v oz. Imandra v usloviyakh ego promyshlennogo zagryazneniya [Accumulation of heavy metals in Lake Imandra under the conditions of its pollution with industrial waste]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2000. Vol. 27, no. 3. P. 279–287.

*Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Kashulin A. N.* Nekotorye aspekty sovremennogo sostoyaniya presnovodnykh resursov Murmanskoi oblasti [Some aspects of the current state of freshwater resources of the Murmansk Region]. *Vestnik MGTU* [Proceed. Murmansk St. Tech. Univ.]. 2013. Vol. 16, no. 1. P. 98–107.

*Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P., Ilyashuk B. P., Ilyashuk E. A., Sandimirov S. S., Kagan L. Ya., Vandysh O. I., Sharov A. N., Sharova Yu. N., Koroleva I. M., Moiseenko T. I. (ed.)* Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra [Anthropogenic modifications of the ecosystem of Lake Imandra]. Moscow: Nauka, 2002. 487 p.

*Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A.* Rasseyannye elementy v poverkhnostnykh vodakh sushii: tekhnofil'nost', bioakkumulyatsiya i ekotoksikologiya [Scattered elements in surface waters of the land: technophilicity, bioaccumulation, and ecotoxicology]. Moscow: Nauka, 2006. 261 p.

*Moiseenko T. I., Gashkina N. A.* Bioakkumulyatsiya rtuti v rybakh kak indikator urovnya zagryazne-

niya vod [Bioaccumulation of mercury in fish as an indicator of water pollution]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 2016. Vol. 54, no. 6. P. 485–493. doi: 10.1134/S0016702916060045

*Moore J. V., Ramamurthy S.* Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh. Kontrol' i otsenka vliyaniya [Heavy metals in natural waters. Monitoring and impact assessment]. Moscow: Mir, 1987. 288 p.

*Rikhter G. D.* Fiziko-geograficheskii ocherk ozera Imandra i ego basseina [Physiographic description of Lake Imandra and its basin]. Leningrad: Gostekhizdat, 1934. 144 p.

*Vinogradov A. P.* Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornnykh porod zemnoi kory [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 1962. No. 7. P. 555–571.

*Yugai V. S., Dauval'ter V. A., Kashulin N. A.* Granulometricheskii i khimicheskii sostav donnykh otlozhenii ozer Bol'shoi i Malyi Vudyavr [Granulometric and chemical composition of sediments of Lakes Bolshoy and Maly Vudyavr]. *Tr. Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNC RAN* [Proceed. Fersman Scientific Session GI KSC RAS]. 2012a. Vol. 9. P. 369–372.

*Yugai V. S., Dauval'ter V. A., Kashulin N. A.* Osobennosti formirovaniya donnykh otlozhenii ozera Imandra v zone vozdeistviya stochnykh vod OAO "Apatit" [Features of sediments formation of Lake Imandra in the zone exposed to the Apatit JSC effluents]. *Ekol. probl. severnykh regionov i puti ikh resheniya: Mat. IV Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchast. Ch. I* [Ecol. probl. of northern regions and ways of their solution: Proceed. IV All-Russ. conf. with int. part. Part. 1]. Apatity: KSC RAS, 2012b. P. 264–268.

*Zakonnov V. V., Komov V. T., Gremichikh V. A., Kas'yanova V. V., Kostrov A. V.* Rol' sedimentatsii v nakoplenii rtuti v donnykh otlozheniyakh Gor'kovskogo i Cheboksarskogo vodokhranilishch [The role of sedimentation in the accumulation of mercury in the bottom sediments of the Gorky and Cheboksary reservoirs]. *Bassein Volgi v XXI-m veke: struktura i funktsionirovaniye ekosistem vodokhranilishch* [The Volga Basin in the 21<sup>st</sup> century: The structure and functioning of reservoir ecosystems]. Izhevsk: Publ. Permyakov S. A., 2012. 90–92 p.

*Abry T., Skogheim O. K., Hongve D.* Sedimentene i Tyrifjorden. Tungmetaller og dateringer. Tyrifjordundersokelsen. Oslo: NIVA, Fagrapport Nr. 19, 1982.

*AMAP/UNEP.* Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment. Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemical Branch. 2008. 159 p.

*Bonzongo J. C. J., Nemer B. W., Lyons W. B.* Hydrologic controls on water chemistry and mercury biotransformation in a closed river system: The Carson River, Nevada. *Appl. Geochem.* 2006. Vol. 21. P. 1999–2009. doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.08.010

*Covelli S., Faganeli J., Horvat M., Brambati A.* Porewater distribution and benthic flux measurements of mercury and methylmercury in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 1999. Vol. 48. P. 415–428. doi: 10.1006/ecss.1999.0466

- Dauvalter V.* Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia. *J. Environ. Monit.* 2003. Vol. 5(2). P. 210–215. doi: 10.1039/b301144p
- Douglas E. R.* Sources of mercury contamination in the sediments of small headwater lakes in south-central Ontario, Canada. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1986. Vol. 15. P. 505–512. doi: 10.1007/BF01056562
- Friedmann A. S., Costain K. E., MacLatchy D. L., Stansley W., Washuta E. J.* Effect of mercury on general and reproductive health of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) from Three Lakes in New Jersey. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2002. Vol. 52. P. 117–122. doi: 10.1006/eesa/2002.2165
- Gochfeld M.* Case of mercury exposure, bioavailability and absorption. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2003. Vol. 56. P. 174–179. doi: 10.1016/S0147-6513(03)00060-5
- Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A., Reimann C., Stumpf E. F.* Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia. *Miner. Petrol.* 1999. Vol. 65. P. 87–111. doi: 10.1007/BF01161578
- Håkanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research.* 1980. Vol. 14, iss. 8. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
- Håkanson L., Jansson M.* Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- Hissler C., Probst J. L.* Chlor-alkali industrial contamination and riverine transport of mercury: Distribution and partitioning of mercury between water, suspended matter, and bottom sediment of the Thur River, France. *Appl. Geochem.* 2006. Vol. 21. P. 1837–1854. doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.08.002
- Holmes C. D., Jacob D. J., Yang X.* Global lifetime of elemental mercury against oxidation by atomic bromine in the free troposphere. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 33(20). L20808. doi: 10.1029/2006GL027176
- Johansson K.* Heavy metals in Swedish forest lakes – factors influencing the distribution in sediments. Doctoral thesis. Uppsala University, Sweden. 1988.
- Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Kashulin A. N.* Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk region, Russia. *J. Environ. Sci. Health Pt. A.* 2017. Vol. 52, no. 9. P. 921–929. doi: 10.1080/10934529.2017.1318633
- Lamborg C. H., Fitzgerald W. F., O'Dormel J., Torgersen T.* A non-steady-state compartmental model of global scale mercury biogeochemistry with inter-hemispheric atmospheric gradients. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2002. Vol. 66. P. 1105–1118. doi: 10.1016/S0016-7037(01)00841-9
- Le Roux S. M., Turner A., Millward G. E., Ebdon L., Appriou P.* Partitioning of mercury onto suspended sediments in estuaries. *J. Environ. Monit.* 2001. Vol. 3. P. 37–42. doi: 10.1039/b007093i
- Mason R. P., Fitzgerald W. F., Hurley J., Hanson A. K., Donaghay P. L., Sieburth J. M.* Mercury biogeochemical cycling in a stratified estuary. *Limnol. Oceanogr.* 1993. Vol. 38. P. 1227–1241. doi: 10.4319/lo.1993.38.6.1227
- Mason R. P., Laurier F. J. G., Wlialin L., Sheu G. R.* The role of ocean-atmosphere exchange in the global mercury cycle. *Journal de Physique.* 2003. Vol. 107. P. 835–838. doi: 10.1051/jp4:20030428
- Megar S. A.* Polluted precipitation and the geochronology of mercury deposition in lake sediments of Northern Minnesota. *Water, Air, Soil Pollut.* 1986. Vol. 30. P. 411–419. doi: 10.1007/BF00305211
- Merritt K. A., Amirbahman A.* Mercury dynamics in sulfide-rich sediments: geochemical influence on contaminant mobilization within the Penobscot River estuary, Maine, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. Vol. 71. P. 929–941. doi: 10.1016/j.gca.2006.10.012
- Molvær J., Knutsen J., Magnusson J., Rygg B., Skei J., Sørensen J.* Classification of environmental quality in fjords and coastal waters. A guide. Norwegian Pollution Control Authority. SFT TA-1467/1997, 1997.
- Mudroch A., Sarazin L., Lomas T.* Summary of surface and background concentrations of selected elements in the Great Lakes sediments. *Great Lakes Res.* 1988. Vol. 14, no. 2. P. 241–251. doi: 10.1016/S0380-1330(88)71553-1
- Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G., Ludwig L. L., Vereault D. V., Traaen T. S.* Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.
- Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S.* Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment. Oslo: NIVA-Report 41/1996, 1996. 18 p.
- Pacyna J. M., Pacyna E. G.* An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environ. Rev.* 2001. Vol. 4. P. 269–298. doi: 10.1139/er-9-4-269
- Pacyna J. M., Pacyna E. G.* Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995. *Water, Air, and Soil Pollution.* 2002. Vol. 137. P. 143–165. doi: 10.1023/A:1015502430561
- Rada R. G., Wiener J. G., Wintrey M. R., Powel D. E.* Recent increases in atmospheric deposition of mercury to North Central Wisconsin lakes inferred from sediment analyses. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1989. Vol. 18. P. 175–181. doi: 10.1007/BF01056202
- Rekolainen S., Verta M., Liehu A.* The effect of airborne mercury and peatland drainage on sediment mercury content in some Finnish forest lakes. Helsinki: National Board of Water, 1986. P. 11–21.
- Rognerud S.* Kvikksolv i Mjosa's sedimenter. Oslo: NIVA-rapport 0–82105, 1985.
- Rognerud S., Norton S. A., Dauvalter V.* Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p.
- Scheulhammer A. M., Meyer M. W., Sandheinrich M. B., Murray M. W.* Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals and fish. *Ambio.* 2007. Vol. 36. P. 12–18. doi: 10.1579/0044-7447(2007)36 [12:EOEMOT]2.0.CO;2
- Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.* Canadian Environmental Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment,

2018. URL: <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html> (accessed: 04.09.2018).

Selin N. E., Jacob D. J., Park R. J., Jantosca R. M., Strode S., Jaegle L., Jaffe D. Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury: Global constraints from observations. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D 02308. doi: 10.1029/2006JD007450

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As-NLH, 1979, no. 2, 7 p.

Suchanek T. H., Mullen I. H., Lamphere B. A., Richerson P. J., Woodmansee C. E., Slotton D. G., Hamer E. J., Woodward L. A. Redistribution of mercury from contaminated lake sediments of Clear Lake, California. *Water Air Soil Pollut.* 1998. Vol. 104. P. 77–102. doi: 10.1023/A:1004980026183

Swain E. B., Engstrom D. R., Brigham M. E., Henning T. A., Brezonik P. L. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America. *Science.* 1992. Vol. 257. P. 784–787. doi: 10.1126/science.257.5071.784

Tenhola M., Lummaa M. Regional distribution of zinc in lake sediments from eastern Finland. *Symposium on Economic Geology, Dublin, Ireland, 26–29 August, 1979.* P. 67–73.

UNEP, 2013. *Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport.* UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. 42 p. URL: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11401/GlobalMercuryAssessment2013.pdf?sequence=1&amp%3BisAllowed=> (accessed: 25.02.2019).

Waldron M. C., Colman J. A., Breault R. F. Distribution, hydrologic transport, and cycling of total mercury and methyl mercury in a contaminated river-reservoir-wetland system (Sudbury River, eastern Massachusetts). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2000. Vol. 57. P. 1080–1091.

Received October 12, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Даува́льтер Влади́мир Андре́евич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем, д. г. н., проф.  
Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»  
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209  
эл. почта: [vladimir@inep.ksc.ru](mailto:vladimir@inep.ksc.ru)  
тел.: (81555) 79774

## CONTRIBUTOR:

### Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems –  
Subdivision of the Federal Research Center  
“Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”  
14 Akademgorodok, 184209 Apatity,  
Murmansk Region, Russia  
e-mail: [vladimir@inep.ksc.ru](mailto:vladimir@inep.ksc.ru)  
tel.: (81555) 79774

УДК 556.114.6:546.28 (470.22)

## КРЕМНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ГУМИДНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАРЕЛИИ)

**А. В. Рыжаков<sup>1</sup>, В. В. Вапиров<sup>1,2</sup>, И. А. Степанова<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Петрозаводский государственный университет, Россия

Впервые изучено распределение растворенных форм кремния в природных водах Карелии: мономерной ортокремниевой кислоты, поликремниевых кислот и кремния в составе растворенных органических соединений. Установлена линейная зависимость между концентрацией кремнийсодержащих органических соединений и косвенными характеристиками содержания органических веществ с коэффициентом корреляции, равным 0,85. Определена сезонная изменчивость концентрации общего растворенного кремния и соотношение его форм в разнотипных водных объектах на территории Карелии. Установлено, что наименьшее содержание растворенного кремния наблюдается в весенне-летний период в связи с продуцированием диатомового планктона. Предложена методика количественного определения кремния в составе органических соединений в природных водах с помощью персульфатного окисления в щелочном растворе.

**Ключевые слова:** поверхностные водные объекты Карелии; Онежское озеро и его притоки; формы кремния в природных водах; гумусовые вещества; диатомовые водоросли.

### **A. V. Ryzhakov, V. V. Vapirov, I. A. Stepanova. SILICON IN SURFACE WATERS OF THE HUMID ZONE (THE CASE OF KARELIAN WATERBODIES)**

We report a first investigation of the following dissolved forms of silicon in natural waters of Karelia: monomeric orthosilicic acid, polysilicic acids and silicon within dissolved organic compounds. A linear relationship was found between the concentration of the silicon-bearing organic compounds and indirect characteristics of organic matter content, with the correlation coefficient at 0.85. The seasonal variation of total dissolved silicon concentration and the ratio of its forms in different types of water bodies in Karelia were determined. The content of dissolved silicon was the lowest in spring and summer due to diatom plankton production. A technique has been suggested for tallying silicon within organic compounds in natural waters using persulfate oxidation in alkaline solution.

**Keywords:** surface water bodies of Karelia; Lake Onego and its inflows; forms of silicon in natural waters; humic substances; diatoms.

## Введение

Кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре. Его кларк составляет 28 % [Rudnich, Gao, 2004]. Силикаты и алюмосиликаты – это самый распространенный в природе класс минералов, на который приходится около 80 % массы земной коры. Обогащение кремнием природных вод происходит в основном в результате выщелачивания кремнийсодержащих пород. В связи с этим кремний относят к литофильным элементам. Подземные воды обычно более богаты кремнием, чем поверхностные. Что касается атмосферных осадков, то среднее содержание кремния в них не превышает 0,02 мгSi/л и они не вносят существенного вклада в поступление этого элемента в водные объекты [Лозовик, Потапова, 2006].

Наряду с фосфором и азотом кремний относится к биогенным элементам. Он участвует в построении костной ткани (скелета) живых организмов. Биологический круговорот кремния в природных водах обусловлен жизнедеятельностью диатомовых планктонных водорослей и последующим растворением их скелетов [Conley, 1997]. При разложении животных и растительных остатков он поступает обратно в водную среду. Однако в отличие от фосфора и азота кремний редко лимитирует процессы первичной продукции в природных водах. Известно, что он может ограничивать развитие планктона в весенне-летний период в фотическом слое, что наблюдается примерно в 10 % водных объектов на территории Карелии [Лозовик, 2006]. Содержание кремния в питьевой воде в России регламентировано и составляет 10 мг/л [СанПиН..., 2001]. В 80 % водоемов Карелии концентрация его растворенных форм намного ниже этого значения [Лозовик, 2006].

В водоемах кремний находится в растворенных и взвешенных формах. Растворенные формы представлены главным образом кремниевой (ортокремниевой) кислотой и ее ассоциатами (поликремниевыми кислотами). Последние имеют переменный состав  $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ . Повышение концентрации ортокремниевой кислоты, понижение температуры и pH способствует процессу полимеризации. При количественном химическом анализе наибольшее аналитическое значение имеют именно эти формы, потому что они наиболее легко потребляются водными организмами. Кремний в составе органических веществ (ОВ) также может находиться в растворенном состоянии. Наибольшее значение среди таких соединений имеют ассоциаты кремниевой кислоты

с гумусовыми веществами, связь между компонентами в которых носит ковалентный характер и усиливается за счет возникновения водородной связи [Камбалина и др., 2014]. Логично предположить, что должна существовать корреляционная связь между концентрацией этих комплексов кремния и содержанием гумусовых веществ в природной воде. Взвешенный кремний – это отдельные частицы кремнийсодержащих материалов размером более 0,45 мкм. Взвешенные формы кремния (а также алюминия) являются основными компонентами минерального вещества, которое седиментирует в водном объекте [Линник, Дикая, 2014]. Количество взвешенных форм кремния в водоемах и водотоках Карелии в среднем достигает 0,6 мгSi/л, и их содержание может превышать концентрацию растворенных форм [Лозовик, 2006].

Целью данной работы являлось изучение содержания и сезонного распределения растворенных форм кремния в водоемах и водотоках на территории Карелии, которые принадлежат к поверхностным водам гумидной зоны.

## Материалы и методы

Содержание растворенной кремниевой кислоты (в пересчете на Si) исследовано в 794 водных объектах (542 озера и 252 реки). Были использованы архивные и современные данные лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС за 1960–2017 гг. Также в 2017–2018 гг. проводились исследования различных растворенных форм кремния и их соотношения в Онежском озере, его заливах – Петрозаводской и Кондопожской губах и некоторых притоках северо-западного побережья озера – реках Шуге, Лососинке, Неглинке и Нелуксе (устье). Речные пробы отбирали с поверхностного горизонта, а озерные – с поверхностного и придонного. В фильтрованных пробах воды (фильтры мембранные «Владипор» МФАС-X-1; 0,45 мкм) определялись следующие формы: ортокремниевая кислота  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , растворенная полимерная кремниевая кислота и общий растворенный кремний ( $\text{Si}_{\text{общ}}$ ), включающий в том числе кремнийсодержащие растворенные органические соединения ( $\text{Si}_{\text{орг}}$ ). Исследования в 2012 и 2017–2018 гг. проводились в сезонном плане для установления закономерностей изменения общего содержания и соотношения этих форм в зависимости от интенсивности протекания внутриводоемных процессов.

Определение растворенной кремниевой кислоты выполняли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты

[Аналитические..., 2017]. Для определения растворенных поликремниевых кислот за основу брали методику [Камбалина и др., 2014]. К пробам воды объемом 50 мл в полипропиленовых сосудах добавляли по 1 мл раствора NaOH (2 моль/л), нагревали при 100 °С в течение 1 часа. После охлаждения нейтрализовали раствором HCl (5 моль/л) до значений pH 6,5–7,5, далее проводили определение кремниевой кислоты, как указано выше. Содержание поликремниевых кислот находили по разности концентраций кремния после гидролиза и в исходной воде.

Для количественного определения кремнийсодержащих органических соединений существует методика их фотохимической деструкции [Линник, Дикая, 2014]. Нами был использован другой способ минерализации этих веществ – с помощью персульфатного окисления в щелочной среде. Эта методика применяется, например, для количественного определения общего азота в природных водах [Аналитические..., 2017]. К пробам объемом 10 мл добавляли по 1 мл раствора NaOH (0,6 моль/л), 50 мг перекристаллизованного персульфата калия, помещали в герметично закрывающиеся тefлоновые автоклавы и нагревали при 170 °С в течение 20 минут и далее при 200 °С в течение 20 минут в микроволновой системе пробоподготовки Berghof speed wave (Германия). При этих условиях все органические вещества минерализуются, а образующуюся кремниевую кислоту после подкисления 0,5 мл раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,5 моль/л) определяли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты, как указано ранее. По разности концентраций растворенного общего кремния и других растворенных форм (ортокремниевой и поликремниевых кислот) рассчитывали содержание растворенного органического кремния (Si<sub>орг</sub>). Значения цветности и перманганатной окисляемости (ПО) проб воды для расчета показателя гумусности проводили в соответствии с методиками [Аналитические..., 2017].

## Результаты и обсуждение

Природные воды гумидной зоны содержат большое количество аллохтонного органического вещества. Это вносит свою специфику в общее содержание кремния, и особенно его растворенных форм.

### *Растворенная кремниевая кислота*

Содержание растворенной кремниевой кислоты в поверхностных водах Карелии обычно не превышает 6, а среднее арифметическое

Таблица 1. Статистические характеристики содержания растворенной кремниевой кислоты в поверхностных водах Карелии [Лозовик, 2006; Озера..., 2013], мгSi/л

Table 1. Statistical characteristics of the dissolved silicic acid content in surface waters of Karelia [Lozovik, 2006; Lakes..., 2013], mgSi/l

Статистические показатели Statistical indicators	Реки Rivers	Озера Lakes	Все объекты All objects
Мин Min	0,0	0,0	0,0
Макс Max	6,1	9,6	9,6
Ср. арифм. Arithmetic mean.	2,3	1,6	1,8
Ср. геом. Geometric mean.	1,9	1,2	1,4
Медиана Median	2,1	1,4	1,7
Ст. откл. Standard deviation	1,3	1,2	1,3
1-й квартиль 1-st quartile	1,5	0,7	0,9
3-й квартиль 3-rd quartile	3,0	2,2	2,4
n	252	542	794

значение составляет 1,8 мгSi/л (табл. 1, рис. 1), что определяется низкой растворимостью SiO<sub>2</sub> в воде.

В 75 % объектов содержание H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> изменяется от 0 до 2,2 мгSi/л, причем это изменение имеет линейный характер, а распределение кремния в большинстве объектов соответствует нормальному, что указывает на его поступление главным образом за счет процессов выщелачивания из пород. Наибольшие концентрации H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> обнаружены в высокоэвтрофных озерах Пелдо и Иматозеро (бассейн р. Шуи) – около 7 и 10 мгSi/л соответственно, а минимальные наблюдаются в озерах с преобладанием атмосферного питания (Чучъярви, Голубая ламба, Девичья ламба и др.). В речных водах ее среднее арифметическое содержание составляет 2,3 мгSi/л, что несколько больше, чем в озерных (табл. 1). Более низкая концентрация кремниевой кислоты в озерных водах по сравнению с речными связана с ее потреблением фитопланктоном, седиментацией в составе последнего и захоронением в донных отложениях. В связи с тем, что содержание H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> в большинстве объектов меньше предела растворимости SiO<sub>2</sub>, по-видимому, первый процесс все-таки является основным, а ее седиментация происходит незначительно.

В весенне-летний период в фотическом слое наблюдается наименьшее содержание

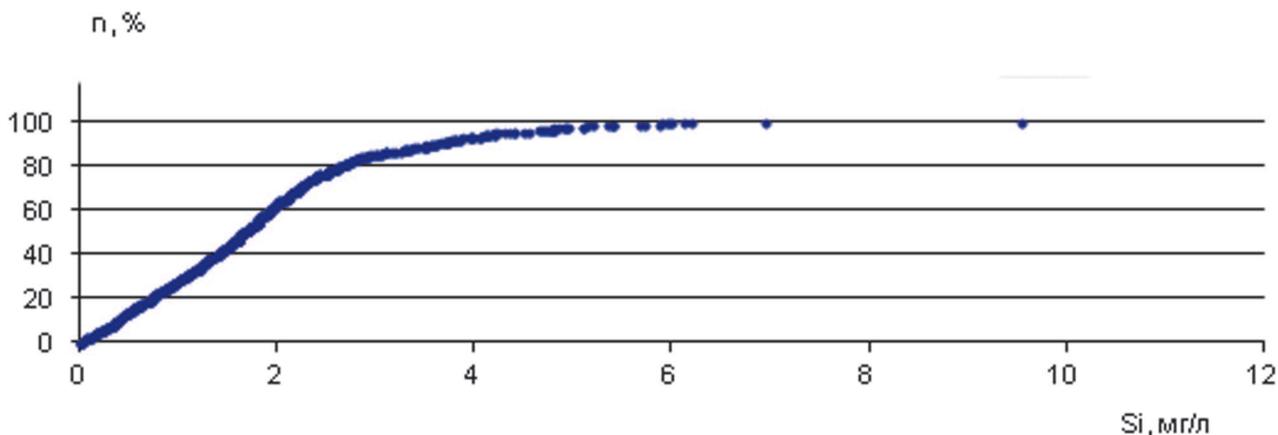


Рис. 1. Распределение содержания кремниевой кислоты (в пересчете на Si) в водных объектах Карелии (по накопленным процентам)

Fig. 1. Distribution of silicic acid content in water bodies of Karelia (by accumulated percentages)

растворенного кремния по сравнению с другими сезонами и придонными слоями воды. В связи с этим считается, что он может лимитировать развитие планктона при концентрации менее 0,2 мгSi/л [Schelske, 1976].

Значения концентраций растворенной ортокремниевой кислоты в разнотипных озерах Карелии в различные гидрологические сезоны 2012 г. представлены в таблице 2. Эти озера различаются своими гидрологическими характеристиками и химическим составом воды, в первую очередь содержанием биогенных элементов и ОВ, которые определяют их трофический статус [Озера..., 2013]. Максимальная концентрация кремниевой кислоты наблюдалась в большинстве озер в зимний период. Особенно заметна сезонная изменчивость для озер с более высоким содержанием  $H_4SiO_4$  – Валгомозеро и Салонъярви. Весной и летом активизируется деятельность диатомового планктона, потребляющего растворенный кремний для своего роста, и его концентрация снижается. Для озер с невысоким содержанием этого элемента сезонные различия отмечаются слабее.

#### Растворенные поликремниевые кислоты

Исследования, выполненные в Петрозаводской губе Онежского озера и притоках, впадающих в нее (реках Шуе, Лососинке, Неглинке и Нелуксе), показали, что содержание растворенных поликремниевых кислот в их воде очень незначительно. Так, в пробах воды, отобранных осенью 2017 г. в Петрозаводской губе, концентрация ортокремниевой кислоты равнялась 0,59 и 0,53 мгSi/л в поверхностном и придонном горизонтах, а поликремниевых – только

Таблица 2. Концентрация растворенной кремниевой кислоты в исследованных озерах на территории Карелии в различные гидрологические сезоны 2012 г., мгSi/л

Table 2. Concentration of dissolved silicic acid in the studied lakes on the territory of Karelia in different hydrological seasons of 2012, mgSi/l

Озеро Lake	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer
Вегарусъярви Vegarussyarvi	2,9	1,9	1,8
Урозеро Urozero	0,2	0,3	0,3
Вендюрское Vendyurskoye	2,7	2,6	2,3
Урос Uros	0,2	0,3	0,2
Салонъярви Salonyarvi	2,7	1,7	1,7
Яндомозеро Yandomozero	0,8	0,3	0,9
Валгомозеро Valgomozero	3,0	2,6	0,2
Святозеро Svyatozero	0,5	0,5	0,5
Крошнозеро Kroshnozero	1,4	1,4	0,8

0,05 мгSi/л в обоих образцах. В воде р. Лососинки летом 2017 г. концентрации этих форм кремния были 2,58 и 0,02 мгSi/л соответственно. Результаты аналогичных опытов, проведенных в Петрозаводской губе в другие сроки и на других водных объектах (например, в центральной части Онежского озера, р. Шуе) в различные гидрологические сезоны 2017–2018 гг., также свидетельствуют о незначительной доле поликремниевых кислот (в среднем около 5 % от концентрации ортокремниевой

кислоты). Поэтому при дальнейших исследованиях определялись только растворенный кремний в виде ортокремниевой кислоты и общий растворенный кремний, а по разности их концентраций вычисляли содержание  $Si_{орг}$ .

*Растворенный общий кремний и кремний в составе органических соединений*

Результаты определения  $Si_{общ}$  и  $Si_{орг}$  представлены в таблице 3. Эти данные показывают, что глубоководная станция центральной части Онежского озера отличается наименьшим содержанием кремния, который практически полностью представлен растворенной кремниевой кислотой, а  $Si_{орг}$  там отсутствует. Вода в центральной части озера характеризуется высоким качеством, она светлая и содержит незначительное количество других биогенных элементов (азота и фосфора) и ОВ. Для оценки качества воды водных объектов по классификации, разработанной в ИВПС П. А. Лозовиком и Н. Н. Филатовым [Озера..., 2013], используются показатели гумусности, щелоч-

ности и трофности. Согласно ей Онежское озеро является олигогумусным, олиготрофным, среднещелочностным водным объектом. Самая низкая концентрация  $H_4SiO_4$  обнаружена летом 2018 г. (0,24 мгSi/л) в поверхностном горизонте, что связано с активным потреблением кремния диатомовым планктоном, как это было обнаружено на примере малых озер Карелии различного трофического статуса в гидрологические сезоны 2012 г. (см. ранее). Летом в придонных слоях содержание  $H_4SiO_4$  почти в 2 раза выше, чем в поверхностном горизонте, и незначительно меньше, чем на этой же станции весной. В заливах Онежского озера (Петрозаводской и Кондопожской губах) речной сток увеличивает содержание биогенных элементов и ОВ по сравнению с центром озера. Соответственно, в этих губах обнаруживается кремний в составе органических веществ ( $Si_{орг}$ ) (табл. 3). Его доля от общего кремния в большинстве исследованных водных объектов составляет 7–35 % в зависимости от сезона года и глубины.

Как и следовало ожидать, повышенное содержание  $Si_{орг}$  отмечается в речных водах,

Таблица 3. Формы кремния и косвенные показатели содержания ОВ в исследованных водных объектах в 2017–2018 гг.

Table 3. Forms of silicon and indirect indicators of OM content in the studied water bodies in 2017–2018

Водный объект, горизонт Water body, horizon	Сезон Season	$H_4SiO_4$	$Si_{общ/tot}$	$Si_{орг/org}$	Цветность, град. Chromaticity, degrees	ПО, мгО/л COD <sub>Mn</sub> , mgO/l
		мгSi/л mgSi/l				
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m	Лето 2017 г. Summer 2017	1,76	2,31	0,55	103	16,6
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		1,77	2,22	0,45	91	16,5
Р. Шуя Shuya river	Зима 2018 г. Winter 2018	2,97	3,07	0,10	—*)	-
Р. Неглинка Neglinka river		3,86	5,34	1,48	-	-
Р. Нелукса Neluksa river		4,27	4,82	0,55	-	-
Р. Неглинка Neglinka river	Весна 2018 г. Spring 2018	4,04	11,08	7,04	-	-
Р. Шуя Shuya river		3,47	4,24	0,77	184	23,1
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		1,33	1,61	0,28	94	11,5
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		1,11	1,65	0,54	77	10,6
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,86	2,00	0,14	76	11,4
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		1,28	1,56	0,28	60	10,6
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,47	0,45	0	-	-

Таблица 3 (окончание)

Table 3 (continued)

Водный объект, горизонт Water body, horizon	Сезон Season	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Si <sub>общ/tot</sub>	Si <sub>опр/org</sub>	Цветность, град. Chromaticity, degrees	ПО, мгО/л COD <sub>Mn</sub> , mgO/l
			мгSi/л mgSi/l			
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,51	0,49	0	-	-
Р. Лососинка Lososinka river		0,84	1,60	0,76	-	-
Р. Шуя Shuya river		2,27	2,96	0,69	174	19,3
Р. Шуя Shuya river	Лето 2018 г. Summer 2018	1,50	2,08	0,58	140	16,6
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		0,28	0,49	0,21	43	7,9
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		0,33	0,46	0,13	44	7,1
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,17	1,38	0,21	76	15,1
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		0,50	0,52	0,02	51	9,5
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,24	0,29	0,05	36	8,3
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,40	0,59	0,19	33	15,7
Р. Шуя Shuya river		1,38	1,68	0,30	125	13,4
Р. Лососинка Lososinka river	Осень 2018 г. Autumn 2018	2,77	3,64	0,87	-	-
Р. Шуя Shuya river		2,01	2,45	0,44	178	17,1
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,60	1,65	0,05	72	14,5
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		1,66	1,72	0,06	72	12,6
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,39	0,39	0	31	6,4
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,39	0,43	0,04	31	6,4
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		0,48	0,48	0	37	6,8
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		0,49	0,58	0,09	36	6,8

Примечание. \*) – нет данных.

Note. \*) – parameters were not estimated.

обогащенных гумусовыми веществами. Так, в устье р. Неглинки, протекающей на территории г. Петрозаводска, весной 2018 г. концентрация общего кремния составляла более 11 мг/л и около 7 мг/л приходилось на долю Si<sub>опр</sub>. Результаты таблицы 3 свидетельствуют, что сезонная динамика распределения кремнийсодержащих ОБ, по-видимому, в большей степени зависит от внешних факторов (например, от объема поступления вод с водосборной территории и их химического состава), чем

от участия этих веществ во внутриводоемном круговороте кремния.

Для характеристики ОБ аллохтонного происхождения в природных водах вводят величину гумусности (ед. гумусности) [Лозовик и др., 2007]. Было установлено, что этот показатель более информативен для оценки качественного и количественного состава ОБ, чем каждая из исходных косвенных характеристик. Нами построена зависимость содержания растворенного органического кремния от гумусности

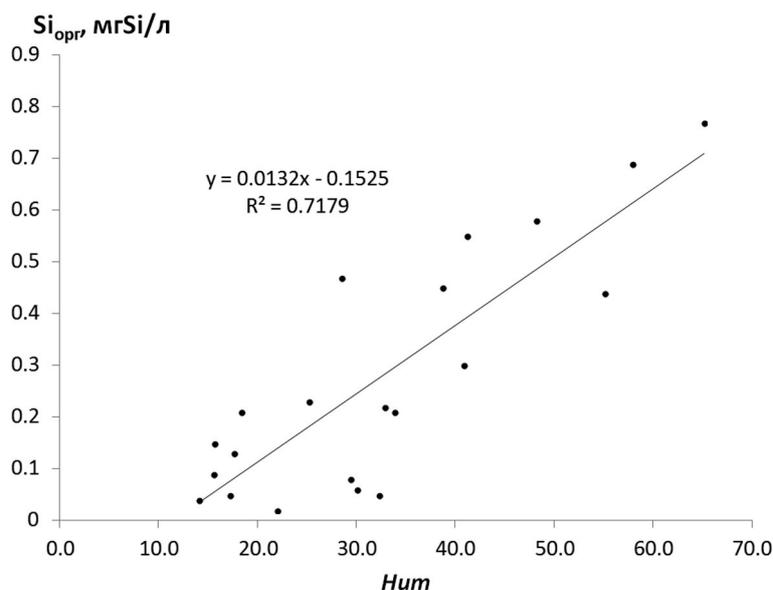


Рис. 2. Зависимость содержания растворенного органического кремния от гумусности воды

Fig. 2. The dependence of dissolved organic silicon content on water humus

воды (рис. 2). Получена линейная зависимость между этими показателями, которая подтверждает предположение о том, что значительная часть растворенного  $Si_{орг}$  действительно присутствует в природных водах гумидной зоны в виде комплексов с гумусовыми веществами.

Таким образом, впервые для водных объектов, расположенных на территории Карелии, установлено содержание, распределение растворенных форм кремния и их сезонная динамика. Для определения кремния в составе органических соединений ( $Si_{орг}$ ) предложена методика, основанная на минерализации органических веществ окислением их персульфатом калия в щелочной среде в микроволновой системе.

## Выводы

1. Основной растворенной формой кремния в поверхностных водах Карелии является кремниевая (ортокремниевая) кислота, которая наиболее легко усваивается диатомовыми водорослями. Ее среднеарифметическая концентрация для всех исследованных водных объектов составляет 1,8 мгSi/л. Это значение в первую очередь определяется низкой растворимостью  $SiO_2$  в воде.

2. Наименьшая концентрация растворенного кремния обнаруживается в летний период, что обусловлено активизацией роста диатомового планктона.

3. Содержание растворенных поликремниевых кислот в исследованных водоемах и водотоках составляет не более 10 % (в среднем 5 %) от концентрации ортокремниевой кислоты.

4. Содержание растворенных кремнийсодержащих органических соединений (главным образом в составе комплексов с гуминовыми веществами) в большинстве исследованных водных объектов изменяется в широких пределах и составляет от 0 до 35 % от общего содержания его растворенных форм. Его концентрация минимальна в низкогумусных водных объектах (Онежском озере и его заливах) и максимальна в речных водах, особенно в период весеннего половодья, что связано с высоким содержанием гумусовых веществ, поступающих с водосборной территории.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).*

## Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика и Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 270 с.

Камбалина М. Г., Скворцова Л. Н., Мазурова И. С., Гусева Н. В., Бакибаев А. А. Исследование форм на-

хождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ // Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии. 2014. Т. 325, № 3. С. 64–70.

Линник П. Н., Дикая Т. П. Содержание, формы нахождения и особенности распределения и миграции кремния в поверхностных водах Украины // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 606–620. doi: 10.7868/S0321059614060133

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

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

Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.

## References

*Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 270 p.

Kambalina M. G., Skvortsova L. N., Mazurova I. S., Guseva N. V., Bakibaev A. A. Issledovanie form nakhozhdeniya kremniya v prirodnykh vodakh s vysokim sodержaniem rastvorennykh organicheskikh veshchestv [Research of the silicon aqueous forms in organic-rich natural water]. *Izv. Tomsk. politekh. un-ta. Khimiya i khim. tekhnologii* [Bull. Tomsk Polytechnic Univ. Chemistry and Chemical Technology]. 2014. Vol. 325, no. 3. P. 64–70.

Linnik P. N., Dikaya T. P. Soderzhanie, formy nakhozhdeniya i osobennosti raspredeleniya i migratsii kremniya v poverkhnostnykh vodakh [Concentrations, coexisting forms, and features of silicon distribution and migration in surface waters of Ukraine]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 606–620. doi: 10.7868/S0321059614060133

Lozovik P. A. Hidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ustoychivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dukhovicheva T. A., Osipova L. A. Allokhthonnoe i avtokhthonnoe organicheskoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh Karelii [Allochthonous and autochthonous organic mat-

*Озера Карелии. Справочник* / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

СанПиН 1.2.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. М., 2002. 62 с.

Conley D. J. Riverine contribution of biogenic silica to the oceanic silica budget // *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42, no. 4. P. 774–777. doi: 10.4319/lo.1997.42.4.0774

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry* / Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. Vol. 3. P. 1–64.

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

Поступила в редакцию 16.11.2011

ter in surface waters in Karelia]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 225–237.

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. Postuplenie khimicheskikh veshchestv s atmosferynymi osadkami na territoriyu Karelii [Input of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2006. Vol. 33, no. 1. P. 111–118.

*Озера Карелии. Справочник* [Lakes of Karelia: a reference book]. N. N. Filatov, V. I. Kukharev (eds.). Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

СанПиН 1.2.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества [SanPiN 1.2.4.1074–01 Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control]. Moscow, 2002. 62 p.

Conley D. J. Riverine contribution of biogenic silica to the oceanic silica budget. *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42, no. 4. P. 774–777. doi: 10.4319/lo.1997.42.4.0774

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust. H. D. Holland, K. K. Turekian (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2004. Vol. 3. P. 1–64.

Schelske C. L. Silica and nitrate depletion as related to rate of eutrophication in lakes Michigan, Huron and Superiors. H. D. Holland, K. K. Turekian (eds.). *Great Lakes Res. Divis. Collected Repr.* 1976. Vol. 5. P. 160–181.

Received November 16, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Рыжаков Александр Вадимович**

заведующий 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

### **Вапиров Владимир Васильевич**

ведущий научный сотрудник лаб. гидрохимии  
и гидрогеологии, д. х. н., проф.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030

заведующий кафедрой общей химии  
Петрозаводский государственный университет  
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: vapirov@petsu.ru  
тел.: (8142) 576541

### **Степанова Ирина Анатольевна**

главный гидрохимик 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: sia146@mail.ru  
тел.: (8142) 576541

## CONTRIBUTORS:

### **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

### **Vapirov, Vladimir**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
  
Petrozavodsk State University  
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: vapirov@petsu.ru  
tel.: (8142) 576541

### **Stepanova, Irina**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: sia146@mail.ru  
tel.: (8142) 576541

УДК 556.114.7: 546.21: 543.632. 14

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗВИТИЯ БПК В ДЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ВОДОЙ ИЗ РАЗНОТИПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАРЕЛИИ**

**А. В. Леонов<sup>1</sup>, М. В. Зобкова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,  
Петрозаводск, Россия*

Представлены данные длительных экспериментов (продолжительностью 84–126 сут) по изучению кинетики биохимического потребления кислорода (БПК) в пробах воды, отобранных из более чем 30 водоемов Карелии, а также в Белом море в 2012–2017 гг. Эксперименты проводились в условиях двух различных температур (10 и 20 °С, а в ряде случаев – при 2 и 10 °С) для оценки температурного коэффициента реакции. Для описания динамики развития БПК использованы два подхода: первый основан на обобщении данных, ранее полученных в результате экспериментов с естественными, загрязненными природными и сточными водами, а второй – путем визуальной классификации типов кривых БПК в серии опытов с пробами воды из разнотипных водоемов Карелии. Выявлено, что особенностью длительных экспериментов, проведенных в этой работе, является развитие БПК по «кажущейся экспоненте» (КЭ) в течение 30–80 сут с начала эксперимента в ряде исследованных проб воды. Это отличается от классического случая, когда окисление автохтонного органического вещества проходит за первые 15–20 сут с начала эксперимента по экспоненциальной кривой. Проведено сравнение значений кинетических параметров развития кривых БПК, рассчитанных как по КЭ, так и по экспоненте за 15–20 сут. По результатам представленных в статье экспериментов определены и объяснены условия формирования КЭ. Объяснен процесс образования характерных типов кривых БПК с приостановлением его развития при различных температурных условиях. Выявлено, что в дальнейшем кинетические параметры длительных БПК-тестов могут быть использованы совместно с характеристиками органического вещества воды для оценки особенностей ее качества.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** биохимическое потребление кислорода; константа скорости потребления кислорода; скорость потребления кислорода; органическое вещество; качество воды.

### **A. V. Leonov, M. V. Zobkova. GENERAL CHARACTERISTICS OF BOD KINETICS IN LONG-TERM EXPERIMENTS WITH WATER FROM KARELIAN WATERBODIES OF VARIOUS TYPES**

Long-term experiments (84–126 days long) on biochemical oxygen demand (BOD) were conducted to study the BOD kinetics in water samples from more than 30 waterbodies of the Karelian region and from the White Sea in different seasons of 2012–2017. The experiments were conducted under two incubation temperatures (10 and 20 °C or 2 and 10 °C) to estimate the temperature coefficient. Two approaches were applied to de-

scribe the BOD kinetics. The first one originated from a compilation of the data previously obtained for natural, contaminated and waste waters. The second one was based on visual classification involving BOD curves plotted for different waterbodies of Karelia. The distinctive feature of the long-term BOD test conducted here is that the BOD curve developed by the "apparent exponent" (APE) model during 30–80 days from the beginning of the experiments in some studied cases. This situation is completely different from the classical case, where autochthonous organic matter oxidation follows the exponential model in the first 15–20 days. BOD curve kinetic parameters were compared for epy APE and exponential models. The origins of APE curve formation were identified and described. The suspension of BOD development under various temperature conditions was explained. In the future, long-term BOD tests can be applied for water quality assessment together with the characteristics of organic matter content.

**Key words:** biochemical oxygen demand; oxygen demand rate constant; oxygen demand rate; organic matter; water quality.

*Памяти  
Петра Александровича Лозовика*

## Введение

Особенности кинетики биохимического потребления кислорода (БПК) часто используют для характеристики окислительной трансформации компонентов органического вещества (ОВ) в природных водах (относительно чистых и загрязненных), развития продукционно-деструкционных процессов, а также при изучении проблем качества водных ресурсов. Кроме того, актуальная задача современных исследований состояния водных объектов и качества воды – выявление соответствия между показателями БПК, фиксируемого в пробах воды, и концентрациями различных компонентов ОВ в этих водах.

Значения БПК оценивают в опытах разной продолжительности: за одни сутки (БПК<sub>1</sub>) – для характеристики продукционно-деструкционных процессов; за 5 сут (БПК<sub>5</sub>) – для ориентировочной оценки качества воды; за 20 сут (БПК<sub>20</sub>) – для оценки расходования O<sub>2</sub> на окисление лабильной фракции ОВ в исследуемой воде.

В большинстве случаев для описания кинетики БПК в отечественных и зарубежных исследованиях традиционно используется уравнение 1-го порядка Стритера – Фелпса:

$$[\text{БПК}_t] = [\text{БПК}_n] \times (1 - e^{-k \times t}), \quad (1)$$

где БПК<sub>t</sub> – значения БПК в разные моменты времени *t*, мг O<sub>2</sub>/л; БПК<sub>n</sub> – значения полного БПК на окисление лабильной фракции ОВ (часто за БПК<sub>n</sub> принимается значение БПК<sub>20</sub>), мг O<sub>2</sub>/л; *k* – константа скорости БПК, сут<sup>-1</sup>. По значениям *k* и БПК<sub>n</sub> оценивается начальная скорость процесса –  $v_1 = k \times [\text{БПК}_n]$ , мг O<sub>2</sub>/(л × сут).

Уравнение (1) описывает развитие БПК в эксперименте по экспоненциальной зависимости (характерное для относительно чистых

природных вод). Кинетические параметры процесса оценивают по результатам измерений БПК в разные моменты времени *t*. Однако можно оценить значения параметров БПК по двум отдельным измерениям за время *t*<sub>1</sub> и *t*<sub>2</sub> [Бикбулатов, Бикбулатова, 1993]. Комбинация уравнения (1) для двух сроков времени *t*<sub>1</sub> и *t*<sub>2</sub> позволяет получить уравнение (2):

$$\frac{[\text{БПК}_{t_2}]}{[\text{БПК}_{t_1}]} = \frac{1 - e^{-k \times t_2}}{1 - e^{-k \times t_1}}. \quad (2)$$

При *t*<sub>2</sub> = 2 *t*<sub>1</sub> уравнение (2) преобразуется в линейный тип:

$$[\text{БПК}_{t_2}] / [\text{БПК}_{t_1}] = (1 - e^{-k \times t_1}), \quad (3)$$

из которого легко найти значения *k* и БПК<sub>n</sub>:

$$k = 1/t \times \ln \{[\text{БПК}_{t_1}] / (2 \times [\text{БПК}_{t_1}] - [\text{БПК}_{t_2}])\}, \quad (4)$$

$$[\text{БПК}_n] = ([\text{БПК}_{t_2}] / (2 \times [\text{БПК}_{t_1}] - [\text{БПК}_{t_2}])). \quad (5)$$

Если *t*<sub>2</sub> = 3 *t*<sub>1</sub>, то уравнение (2) преобразуется в квадратное уравнение:

$$[\text{БПК}_{t_1}] / [\text{БПК}_{t_1}] = 1 - e^{-k \times t_1} + e^{-2 \times k \times t_1}, \quad (6)$$

из которого также можно установить значение  $e^{-k \times t_1}$  и после его логарифмирования вычислить значение *k*, а затем и [БПК<sub>n</sub>]:

$$[\text{БПК}_t] = [\text{БПК}_{t_1}] \times (1 - e^{-k \times t_1}). \quad (7)$$

Значение *k* отражает степень лабильности ОВ: чем выше значение *k*, тем более биохимически лабильно ОВ, и при этом предельное значение БПК<sub>n</sub> будет достигнуто намного быстрее. Основной смысл взаимосвязи значений БПК<sub>n</sub> и *k* состоит, по-видимому, в оценке скорости окисления ОВ. В отечественной литературе этот факт не обсуждается и нет конкретных рекомендаций по определению кинетических параметров процесса БПК, важных именно для характеристики окисления и преобразования ОВ. В соответствии со значениями *k* ОВ подраз-

деляется по степени биоразлагаемости на: биологически мягкие ОВ ( $k \geq 0,3 \text{ сут}^{-1}$ ); промежуточные ОВ ( $0,06 \leq k < 0,3 \text{ сут}^{-1}$ ) и биологически жесткие ОВ ( $k < 0,06 \text{ сут}^{-1}$ ) [Каплин, 1979].

Экспоненциальное уравнение, как правило, используется для описания развития БПК за первые 20 сут эксперимента. При этом все наблюдаемые значения БПК на участках кривых свыше 20 сут не отражаются этим уравнением. Наличие в испытываемой воде загрязняющих веществ оказывает влияние на кинетику БПК, и его развитие во времени может отступать от классического экспоненциального закона (в динамике БПК появляется задержка развития с начала эксперимента). Несмотря на то, что экспоненциальное уравнение не может описать развитие БПК в длительных экспериментах, оно часто применяется как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях БПК без должной корректировки его развития на разных стадиях.

Предложены разные типы кинетических уравнений для описания экспериментов по БПК, включая случаи, когда развитие БПК отстает от экспоненты [Леонов, 1974; Айзатуллин, Леонов, 1977]. Эти уравнения могут быть применимы к обработке разнообразных данных по БПК независимо от вида кривых и продолжительности экспериментов. Более 40 лет назад для характеристики развития БПК были предложены двенадцать типов уравнений (классификация 1) [Леонов, 1974], из них наиболее часто используются следующие:

*экспоненциальный (E):*

$$\text{БПК} = [O_2]_l (1 - e^{-kt});$$

*автокаталитический (A):*

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1 t} - 1));$$

*экспоненциально-автокаталитический (EA):*

$$\text{БПК} = [O_2]_l (1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02} e^{w_2 t});$$

*полиавтокаталитический (AA):*

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01} e^{w_1 t}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02} e^{w_2 t});$$

*экспоненциально-линейный (EL):*

$$\text{БПК} = [O_2]_l (1 - e^{-kt}) + \omega_s t;$$

*автокаталитически-линейный (AL):*

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1 t} - 1)) + \omega_s t;$$

*экспоненциально-автокаталитически-линейный (EAL):*

$$\text{БПК} = [O_2]_l (1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02} e^{w_2 t}) + \omega_s t;$$

*полиавтокаталитически-линейный (AAL):*

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01} e^{w_1 t}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02} e^{w_2 t}) + \omega_s t.$$

В этих уравнениях  $t$  – время, сут;  $k_i$  – константа скорости БПК I-го порядка,  $\text{сут}^{-1}$ ;  $k_{ki}$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  – константы скорости БПК II-го порядка ( $\text{л} \times \text{мг} O_2^{-1} \times \text{сут}^{-1}$ );  $v_1$ ,  $\omega_s$  – соответственно скорости БПК на I-й стадии и на линейном участке БПК,  $\text{мг} O_2 / (\text{л} \times \text{сут})$ ;  $[O_2]_l$ ,  $[O_2]_l^{\text{II}}$  – предельные значения БПК соответственно на I-й и II-й стадиях,  $\text{мг} O_2 / \text{л}$ ;  $B_{01}$ ,  $B_{02}$ ,  $\eta_{01}$ ,  $\eta_{02}$  – параметры, определяемые при обработке БПК-кривых ( $[B_{0i}] = k_i / k_{ki}$ ;  $[B_{01}] = k_1 / k_{k1}$ ;  $[B_{02}] = k_2 / k_{k2}$ ;  $[\eta_{01}] = [B_{01}] / [O_2]_l^{\text{I}}$ ;  $[\eta_{02}] = [B_{02}] / [O_2]_l^{\text{II}}$ ).

В природных, загрязненных и сточных водах могут присутствовать вещества, которые ингибируют окисление ОВ или характеризуются совершенно разными значениями констант скорости окисления ОВ. Независимо от сложности получаемых в экспериментах типов БПК-кривых необходимо проводить кинетический анализ данных экспериментов, оценивать значения кинетических констант процесса и на их основе выявлять особенности кинетики процесса окисления компонентов ОВ в пробах воды из разных водных объектов.

Идея совместного использования информации по долгосрочной кинетике БПК и содержанию ОВ для характеристики водных объектов была предложена Петром Александровичем Лозовиком, который много лет посвятил исследованию ОВ и его компонентов, а также продукционно-деструкционных процессов на основе кинетики БПК. Поэтому авторами было принято решение продолжить эту работу. В связи с имеющимся большим массивом данных по долгосрочным экспериментам БПК, которые в дальнейшем могут быть использованы для классификации природных вод, установления взаимосвязи с органическим веществом и его компонентами, а также оценки качества воды, необходимо было первоначально подобрать подход к анализу данных БПК-кривых. Поэтому в задачи исследования на этом этапе обобщения экспериментальных данных входило:

- установление и характеристика особенностей типов БПК-кривых;
- выявление оптимального подхода к анализу типов БПК-кривых для определения значений кинетических параметров БПК.

## Материалы и методы

Всего за 2012–2017 гг. было проведено свыше 200 экспериментов по БПК с пробами воды, отобранными из более чем 30 разнотип-

ных водоемов Карелии. В 2012 г. исследования проводились на озерах Урос, Вендюрское, Вегарусъярви, Салонъярви, Крошнозеро, Святозеро, Валгомозеро, Яндомозеро, Урозеро; в 2013 г. – на Белом море, Онежском озере (в Петрозаводской и Кондопожской губах, центральном плесе), р. Шуе, озерах Сямозеро, Шотозеро, Каменное (центральном плесе и губе Камалаhti); в 2014 г. – на озерах Ладожском и Онежском (эпилимнион и гиполимнион), Верхнем и на р. Нева (от истока до устья); в 2015 г. – на озерах Онежском (Петрозаводская губа, центральный плес) и Ладожском (около о. Валаам, на выходе из шхер Сортавалы); в 2016 г. – на оз. Онежском (Петрозаводская губа, центральный плес), р. Шуе и оз. Ладожском (около о. Валаам, на выходе из шхер Сортавалы, в зал. Хиденселькя); в 2017 г. – на оз. Онежском (Петрозаводская губа, центральный плес) и р. Шуе. Для ряда водных объектов отбор проб проводился в различные сезоны для получения данных, характеризующих внутри- и межгодовые отличия в кинетике БПК.

Постановка опытов по кинетике БПК осуществлялась по следующей схеме. После доставки в лабораторию пробы воды помещались в термостаты для установления соответствующей температуры и аэрировались для достижения равновесного содержания  $O_2$  в воде. После чего они разливались по склянкам и термостатировались в темноте (при 2, 10 и 20 °С). Содержание  $O_2$  в склянках фиксировалось в начальный момент времени и через 3, 7, 14, 21, 35, 49, 70, (84), 91 и 126 сут инкубации проб воды (в ряде экспериментов эти сроки определения менялись). В течение пробоотбора дополнительно ставилась контрольная кислородная склянка для определения БПК при транспортировке пробы в лабораторию. В дальнейшем эта величина добавлялась к значению  $BPK_n$ . Для продолжения экспериментов, в которых наблюдалось значительное снижение концентрации  $O_2$ , проводилась повторная их постановка с использованием воды, сохраняемой в термостате параллельно с исследуемой водой. Эта вода дополнительно насыщалась  $O_2$ , затем разливалась по склянкам. В них продолжали проследивать остаточные концентрации  $O_2$ , что позволяло получить полную картину изменений концентрации растворенного  $O_2$  в пробах воды. Растворенный в воде  $O_2$  определяли по методу Винклера [РД..., 2006]. Перед постановкой опытов в пробах воды также определялись значения химического потребления кислорода (ХПК) воды [РД..., 2012].

Серия опытов (продолжительностью до 84–126 сут) выполнялась одновременно

при температурах 10 и 20 °С, а также при 2 и 10 °С. Известны примеры продолжительных исследований кинетики БПК для изучения особенностей трансформации ОВ в природных водах, выполненных на основе экспериментов с пробами воды, – длительностью 5–10 сут (на примере Можайского водохранилища [Леонов, Бердавцева, 1986, 1990]) и ~ 30 сут (для разных притоков Рыбинского водохранилища [Бикбулатов, Бикбулатова, 1993]). Подобные исследования проводятся и в других странах [Ostapenia et al., 2009; Sullivan et al., 2010]. Следует сказать, что полученная в 2012–2017 гг. серия данных по кинетике БПК в пробах воды из водоемов Карелии существенно отличается от выполненных ранее исследований по масштабам одновременных долгосрочных исследований водных объектов, по продолжительности экспериментов, а главное, по разнообразию выявленных сезонных особенностей развития процесса в природных водах.

## Результаты и обсуждение

В процессе выполнения экспериментов по БПК были выделены характерные основные типы БПК-кривых. Их предварительная классификация (далее – классификация 2) была предложена П. А. Лозовиком задолго до завершения экспериментальных исследований и включала три типа кривых – экспоненциальный, линейный и каскадный (в последнем были отмечены две модификации, 3а и 3б, с отличиями развития II-й стадии БПК при 10 и 20 °С) (рис. 1).

Несмотря на то, что классификации БПК-кривых 2 и 1 не связаны друг с другом, между ними

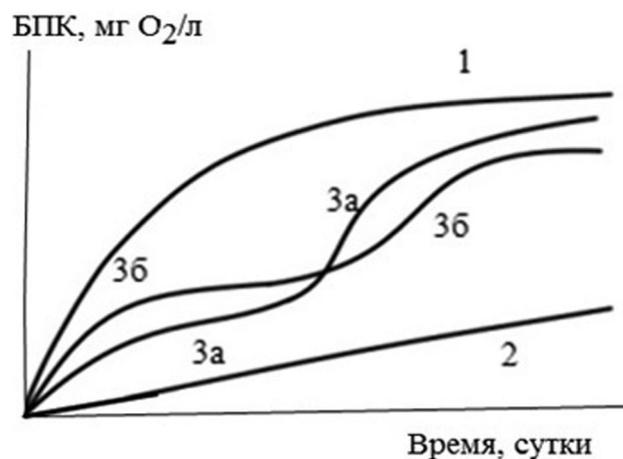


Рис. 1. Типы кинетических кривых БПК: (1) – экспоненциальный, (2) – линейный, (3а) – каскадный при 10 °С, (3б) – каскадный при 20 °С

Fig. 1. BOD curve kinetic types: (1) – exponential, (2) – linear, (3a) – multistage at 10° C, (3b) – multistage at 20° C

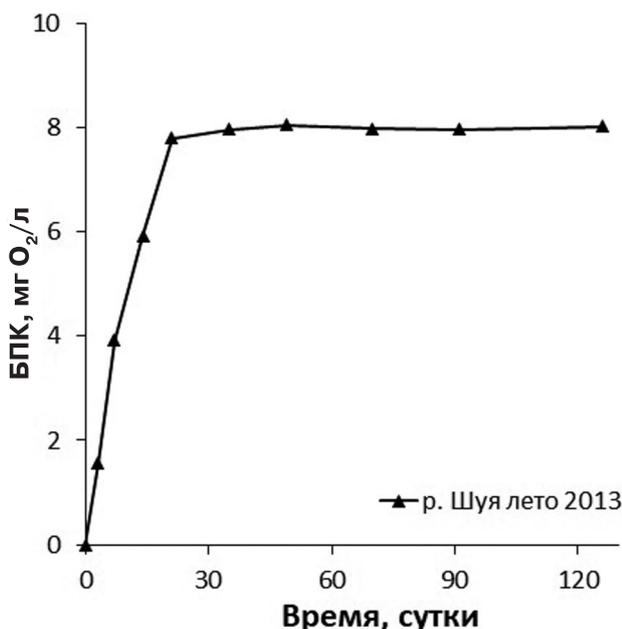


Рис. 2. Развитие БПК в одну стадию (по E-типу) при 20 °С в р. Шуя летом 2013 г.

Fig. 2. BOD kinetic by one stage (E-type) at 20 °C in the Shuya river in summer 2013

в названиях типов кривых нет фундаментальных противоречий. Классификация 1 характеризует особенности развития процесса в длительных экспериментах (названия кривых включают функции, используемые для анализа кинетики БПК), а классификация 2 основана на визуальном сравнении развития процесса в пробах воды из разных водоемов Карелии. В целом две классификации дополняют друг друга, что очень полезно для более полного анализа формирования, обозначения и последующей обработки различных типов развития БПК.

Развитие БПК представляется в виде осредненной кривой, проведенной по всем определениям остаточных концентраций O<sub>2</sub>. Точки, которые ложатся далеко от средней кривой, отбраковывают. В этих экспериментах было отбраковано ~ 25 измерений (или ~1,2 % общего числа измерений), что свидетельствует о высоком качестве работ.

В результате исследования были выделены и охарактеризованы особенности типов развития БПК с ориентацией на классификации 1 и 2:

**I. Экспоненциальный тип развития БПК (E-тип)** – обычно означает активное развитие процесса с начала эксперимента за первые 15–20 сут (продолжительность I-й стадии окисления фракции автотрофного ОВ [Леонов, 1974]). Отличительной особенностью кинетики БПК в водоемах Карелии является его развитие не только по классической экспоненте,

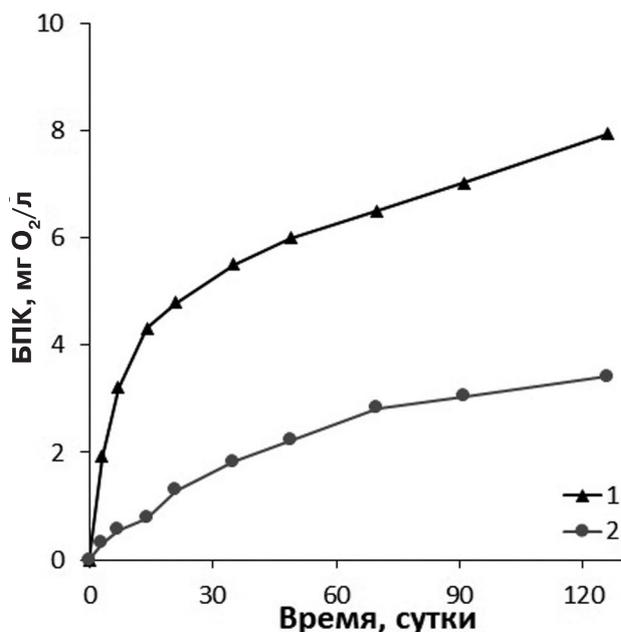


Рис. 3. Развитие БПК по EL-типу в устье р. Нева: (1) – при 20 °С весной и (2) – при 10 °С летом 2014 г.

Fig. 3. BOD kinetic by EL-type in the mouth of the Neva river: (1) – at 20 °C in spring and (2) – at 10 °C in summer 2014

но и по «кажущейся экспоненте» (КЭ) – медленное развитие экспоненты, которое приходится в разных случаях на период 30–80 сут.

Для долгосрочных экспериментов с пробой воды из водоемов Карелии E-тип развития БПК не связан с фиксируемой продолжительностью активного потребления O<sub>2</sub>, так как при длительном изучении процесса E-тип характеризует только его начальную стадию. Развитие БПК (по E-типу) завершается после 15–20 сут с выходом БПК на плато (означает завершение окисления ОВ), что связано либо с полным окислением лабильного ОВ, либо с полным расходом растворенного O<sub>2</sub> в исследуемой воде. В анализируемой серии экспериментов развитие только I-й стадии БПК в течение 15–20 сут отмечено при 20 °С в пробе воды из устья р. Шуя летом 2013 г. При этом завершение процесса в рамках одной стадии не означало полного окисления ОВ, а являлось результатом полного исчерпания растворенного O<sub>2</sub> в воде за 20 суток (рис. 2). Однако в большинстве случаев в серии экспериментов при 10 и 20 °С было отмечено мультистадийное развитие БПК: с начала опыта до 15–20 сут отмечен E-тип БПК (период I-й стадии), далее выход на плато, затем при наличии в воде растворенного O<sub>2</sub> процесс БПК не останавливался (и как вариант, продолжался по линейному типу до конца эксперимента с формированием в итоге EL-типа общего развития БПК) (рис. 3).

Опыт применения уравнений, включающих описание двух стадий БПК (совпадает с E-типом БПК по классификации 1), показал свои преимущества перед применением одностадийного уравнения (E-типа). Выделение линейной стадии позволяет более четко определить значение БПК<sub>n</sub> для I-й стадии процесса [Бикбулатов, Бикбулатова, 1993] и точнее описывать развитие БПК в экспериментах продолжительностью свыше 20 сут [Sullivan et al., 2010].

## II. Линейный тип развития БПК (L-тип).

Обычно линейная стадия следует за I-й стадией, развивающейся по E-типу, или при исходной его задержке – по A-типу (или по автокатализу). Линейное развитие БПК (по L-типу) после его начального участка (по E- или A-типу) регистрируется в долгосрочных экспериментах с относительно чистыми и загрязненными пробами морских вод [Леонов, 1974]. Выявленный в данной серии L-тип развития БПК с начала эксперимента, очевидно, следует признать разновидностью кинетики процесса в пробах воды из водоемов Карелии, причем на выделенных линейных участках отмечается повышенная скорость БПК во многих длительных экспериментах. Эта стадия отсутствует только при полном исчерпании растворенного O<sub>2</sub> в испытываемой воде (либо в ходе I-й стадии процесса, либо после развития следующей, II-й стадии). Случаи фиксирования линейного развития БПК следует рассматривать особенно тщательно для логичного объяснения формирования именно такого типа БПК с начала постановки опыта.

В экспериментах с пробами воды из водоемов Карелии выделяется несколько вариантов осредненного развития БПК по L-типу в разные сезоны (рис. 4). Так, при 10 °C L-тип установлен в воде озер Вендюрское, Вегарусъярви, Салонъярви, Урозера, Урос, Сямозера, Шотозера, Верхнее, а также Петрозаводской губы. При 20 °C высокие скорости БПК отмечены после I-й стадии до полного потребления растворенного O<sub>2</sub> в воде оз. Верхнее в период открытой воды 2014 г. Отметим, что линейное развитие БПК может быть следствием оцениваемого итогового «осредненного» изменения БПК во времени *t* в ходе всего длительного эксперимента. Линейный тип с начала эксперимента следует воспринимать как особенность кинетики БПК в водных объектах Карелии.

Более тщательный анализ первичных данных таких экспериментов показывает, что в первые 10–15 сут имеется развитие I-й стадии БПК (по E-типу), которая отличается малыми значениями БПК<sub>n</sub> (<0,25 мг O<sub>2</sub>/л). Изменения значений БПК на этом начальном этапе «теряются»

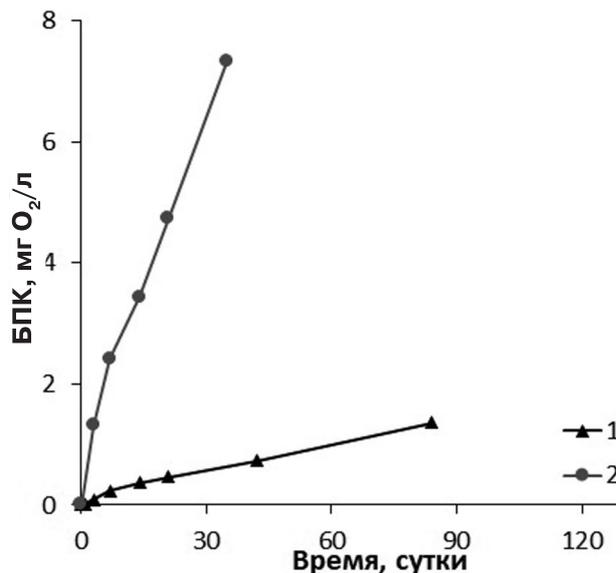


Рис. 4. Условное развитие БПК по L-типу: (1) – при 10 °C в оз. Вендюрское зимой 2012 г. и (2) – при 20 °C в оз. Верхнее летом 2014 г.

Fig. 4. Relative BOD kinetic by L-type: (1) – in Lake Vendurskoe in winter 2012 at 10 °C and (2) – in Lake Verkhnee in summer 2014 at 20 °C

на фоне повышенных значений БПК, фиксируемых в последующие периоды на линейном участке. Очевидно, в экспериментах, где в воде много аллохтонного ОВ, при низкой температуре процесс его окисления развивается довольно медленно. При таких условиях имеющееся в воде ОВ не может активно окисляться, и поэтому в начальные сроки оно не обнаруживается (или при среднем общем изменении БПК не фиксируется). Однако в таких водах при 20 °C в экспериментах отмечается более выраженное развитие БПК на I-й стадии по E-типу.

## III. Каскадный тип развития БПК.

В экспериментах продолжительностью более 100 сут независимо от особенностей исследуемых вод регистрируется несколько стадий БПК. Каскадное (или мультистадийное) развитие БПК визуально отмечается, как правило, при исследовании процесса в пробах загрязненных природных, а также сточных вод. В экспериментах с водой из водоемов Карелии было выделено два типа развития каскадного БПК с вариациями развития I-й стадии процесса при температурах 10 и 20 °C (рис. 5).

Каскадный тип развития часто отмечается в экспериментах при 20 °C с пробами относительно чистой морской воды [Леонов, 1977]. Вода поверхностного слоя Белого моря – это речной сток, разбавленный морской водой. Данные эксперимента с водой из Белого моря (рис. 5) показывают, что в поверхностных водах при 20 °C развитие БПК описывается уравне-

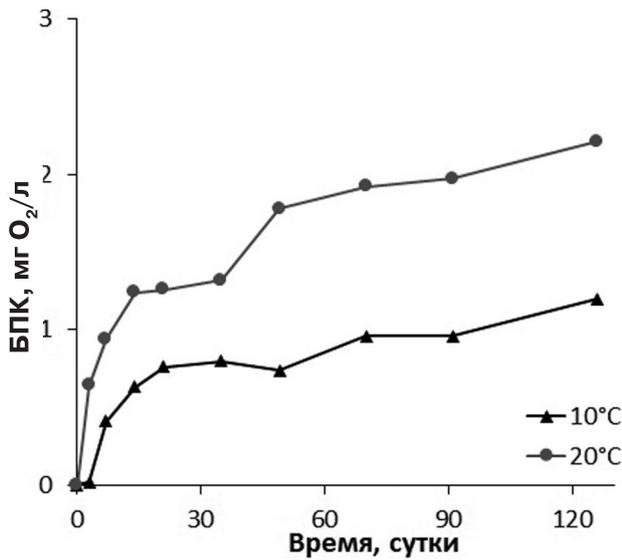


Рис. 5. Развитие BPK при 10 и 20 °С в воде из Белого моря летом 2013 г.

Fig. 5. BOD kinetic at 10 and 20 °C in the White Sea water in summer 2013

нием ААL-типа (две стадии по А-типу + линейная составляющая):

$$\text{BPK} = 0,357 \times (e^{0,436t} - 1) / (1 + 0,313 \times e^{0,436t}) + 4,87 \times 10^{-10} \times (e^{0,493t} - 1) / (1 + 1,32 \times 10^{-9} \times e^{0,493t}) + 0,0056 \times t,$$

со значениями параметров BPK на I-й стадии:  $[O_2]'$  = 1,14;  $w_1$  = 0,436;  $B_{01}$  = 0,357;  $v_1$  = 0,117;  $\omega_s$  = 0,0056. При 10 °С развитие BPK описывается уравнением AL-типа (фиксируется одна стадия А-типа с линейным продолжением до конца эксперимента):

$$\text{BPK} = 0,0506 \times (e^{0,338t} - 1) / (1 + 0,0767 \times e^{0,338t}) + 0,0042 \times t,$$

при значениях кинетических параметров:  $[O_2]'$  = 0,66;  $w_1$  = 0,338;  $B_{01}$  = 0,0506;  $v_1$  = 0,0113;  $\omega_s$  = 0,0042 (рис. 5). Отметим, что в длительных экспериментах с пробами относительно чистых морских и океанических вод развитие BPK, как правило, соответствовало EL- и AL-типам с предельными значениями  $[O_2]'$  на I-й стадии, близкими к наблюдаемым в экспериментах с водой из Белого моря (0,66–1,14 мг  $O_2$ /л) и с очень близкими значениями скорости BPK на линейных участках ( $\omega_s$  = 0,0042–0,0056 мг  $O_2$ /(л × сут)) [Леонов, 1977].

В относительно чистых природных водах при длительной экспозиции проб воды развитие BPK прослеживается в две стадии: I-я стадия может развиваться довольно активно (по E-типу) или с некоторой задержкой во времени (по А-типу), а II-я развивается линейно (по L-типу). Комбинация этих вариаций дает

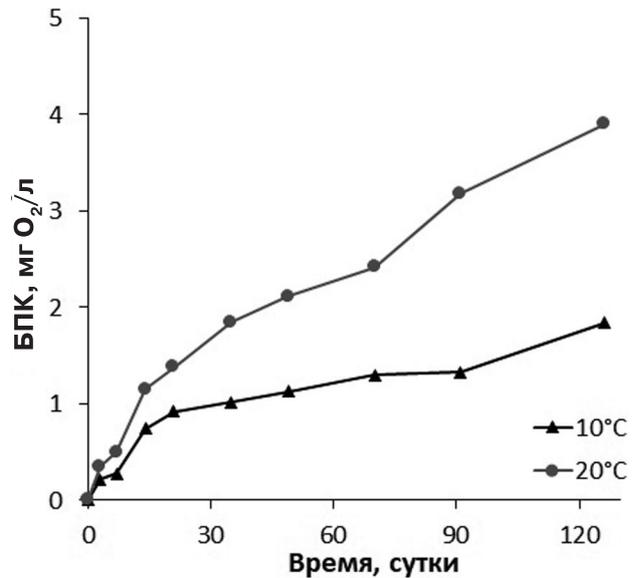


Рис. 6. Развитие BPK (по AL-типу) в оз. Каменное летом 2013 г. при 10 и 20 °С

Fig. 6. BOD kinetic (AL-type) in Lake Kamennoe in summer 2013 at 10 and 20 °C

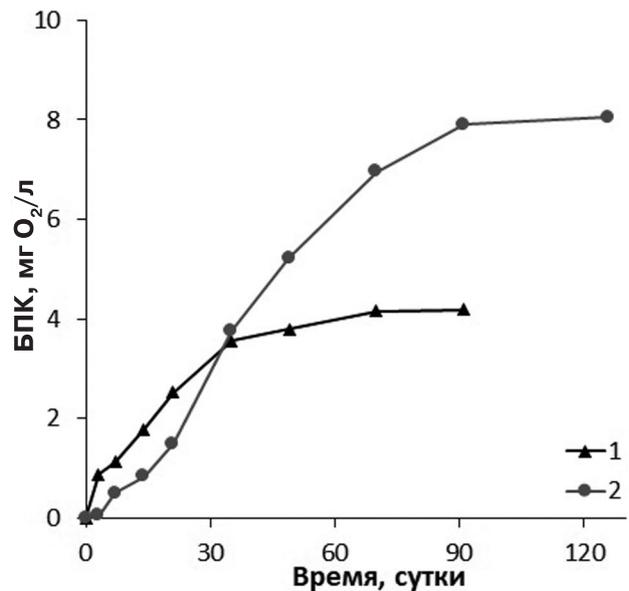


Рис. 7. Развитие BPK при 20 °С в р. Шуя: (1) – по EA-типу зимой и (2) – по AA-типу весной 2017 г.

Fig. 7. BOD kinetic at 20 °C in the Shuya river: (1) – by EA-type in winter and (2) – AA-type in spring 2017

соответственно EL- или AL-типы развития BPK, как, например, в воде из оз. Каменное при 20 и 10 °С (рис. 6). При активизации потребления  $O_2$ , отмечаемого на 30–50-е сут эксперимента, имеет место развитие II-й стадии BPK (по А-типу). При исчерпании в воде растворенного  $O_2$  (или при полном окислении имеющегося в воде  $OB$ ) для всего периода фиксируется либо EA-, либо AA-тип развития BPK (рис. 7). Если в исследуемой воде по завершении двух стадий

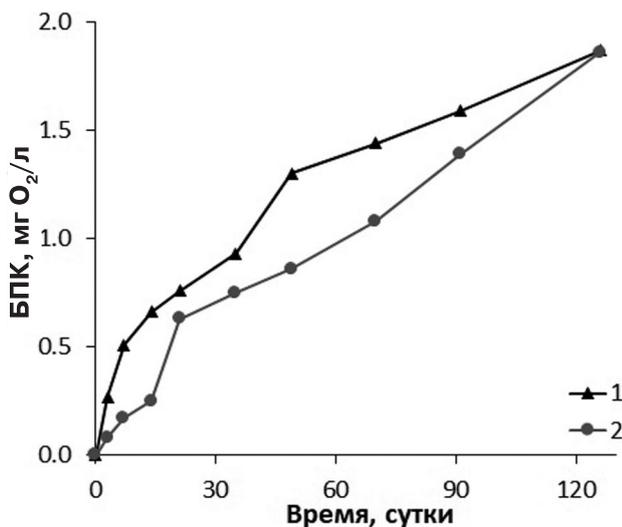


Рис. 8. Развитие БПК при 20 °С: (1) – по EAL-типу в фотическом слое оз. Ладожское осенью 2014 г. и (2) – по AAL-типу в центральной части оз. Онежское весной 2017 г.

Fig. 8. BOD kinetic at 20 °C: (1) – by EAL-type in the Lake Ladoga photic zone in autumn 2014 and (2) – by AAL-type in the Lake Onego central part in spring 2017

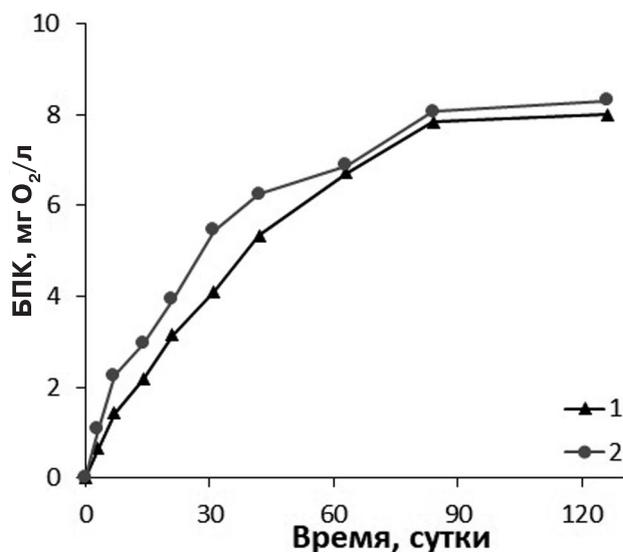


Рис. 9. Развитие БПК по EA-типу при 20 °С с образованием КЭ при истощении растворенного O<sub>2</sub> в воде летом 2012 г.: (1) – оз. Салонъярви; (2) – оз. Яндомозеро

Fig. 9. BOD kinetic by EA-type at 20 °C (development by APE at dissolved O<sub>2</sub> depletion in water in summer 2012): (1) – Lake Salonyarvi and (2) – Lake Yandomozero

остается растворенный O<sub>2</sub>, то процесс БПК продолжается, как правило, с развитием линейной стадии, в целом формируя мультистадийное развитие БПК (по EAL- или по AAL-типу) для всего длительного периода эксперимента (рис. 8).

Таким образом, типы кинетических БПК-кривых, полученные в экспериментах с водой из водоемов Карелии, полностью согласуются с ранее предложенной классификацией 1, которая существенно уточняет классификацию 2.

В ходе исследования неоднократно наблюдались случаи длительного развития БПК по «кажущейся экспоненте» КЭ (с начала эксперимента до 30–80-х сут). При 20 °С КЭ фиксировались с формированием плато (в связи с истощением растворенного O<sub>2</sub>) в озерах Крошнозеро, Яндомозеро, Салонъярви и реке Шуе (рис. 9). При 10 °С формирование плато происходило при сохранении в воде определенного запаса растворенного O<sub>2</sub> и наблюдалось на различных станциях Онежского и Ладожского озер, а также в воде из среднего по течению участка и из устья р. Нева (рис. 10).

Формирование КЭ объясняется слиянием еще не законченного развития БПК на I-й стадии (по E-типу) с началом II-й стадии (по A-типу) без образования плато на кривой БПК между этими стадиями. Так, фиксация по КЭ при 20 °С наблюдалась в различные сезоны в экспериментах с водой из Кондопожской губы

(EAL-тип); оз. Шотозеро (EA-, AA- и EA-типы, с прекращением процесса из-за полного потребления O<sub>2</sub> за 126 сут); оз. Сямозеро (EAL-, AAL-тип). Наличие разрыва между I-й и II-й стадиями БПК можно увидеть в экспериментах при 10 °С с водой из указанных водоемов (рис. 11). Поэтому есть все основания полагать, что I-ю стадию обязательно следует различать при кинетическом анализе данных в таких экспериментах (иногда даже путем подбора значений БПК<sub>n</sub> для этой стадии).

Таким образом, длительное развитие БПК по КЭ (в течение ~ 70 сут) нельзя считать реалистичным результатом окисления однотипного ОВ. Это результат одновременного развития двух стадий процесса БПК вследствие особенностей присутствия или быстро сменяемой последовательной трансформации различных компонентов ОВ в исследуемых водах. Так, содержание автохтонного ОВ в водоемах Карелии меняется мало [Зобкова и др., 2015], поэтому развитие I-й стадии БПК, непосредственно связанной с окислением автохтонного ОВ в водах из разных водоемов, не должно сильно различаться в водоемах одной климатической зоны. Это означает, что окисление автохтонного ОВ на I-й стадии в основном должно осуществляться за первые ~15–20 сут эксперимента. Случаи преобладания автохтонного ОВ отмечались в водоемах с низким удельным водосборным участком ( $DF_{уд} < 5$ ), а также при

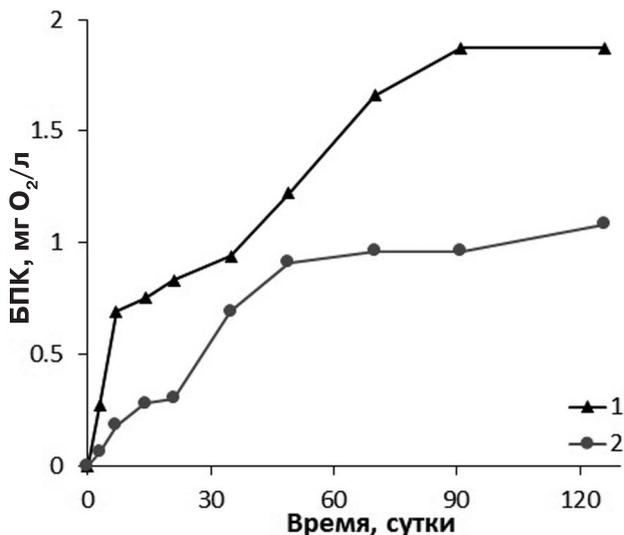


Рис. 10. Развитие БПК при 10 °С с образованием КЭ при наличии в воде растворенного O<sub>2</sub>: (1) – по АА-типу в центральной части оз. Онежское весной и (2) – по ЕА-типу в Кондопожской губе осенью 2013 г.

Fig. 10. BOD kinetic at 10 °C (development by APE at dissolved O<sub>2</sub> presence in water): (1) – by AA-type in the Lake Onego central part in spring and (2) – EA-type in the Kondopoga bay in autumn 2013

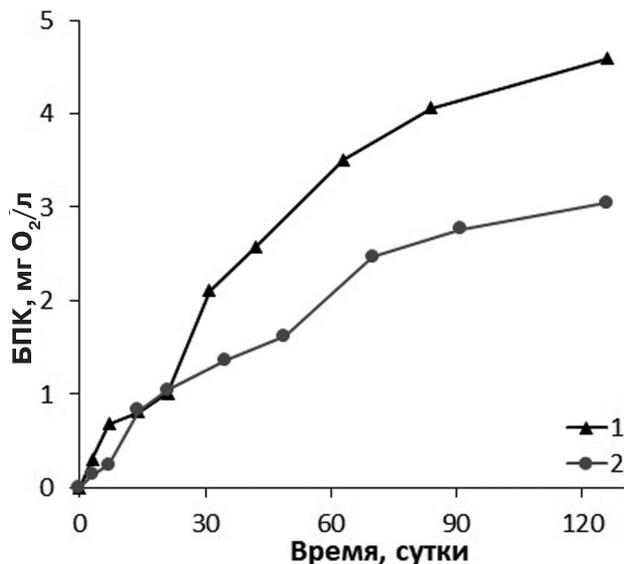


Рис. 11. Развитие БПК при 10 °С с образованием КЭ с сохранением растворенного O<sub>2</sub> в воде: (1) – по EAL-типу в оз. Валгомозеро осенью 2012 г. и (2) – по AAL-типу в воде из истока оз. Ладожское летом 2014 г.

Fig. 11. BOD kinetic at 10 °C (development by APE at dissolved O<sub>2</sub> presence in water): (1) – by EAL-type in Lake Valgomozero in autumn 2012 and (2) – AAL-type in Lake Ladoga in summer 2014

высоком трофическом статусе водоемов [Лозовик и др., 2013; Зобкова и др., 2015]. В поверхностных водных объектах гумидной зоны преобладает аллохтонное ОВ, содержание которого в различных водоемах и водотоках может сильно отличаться [Лозовик и др., 2007; Зобкова и др., 2015]. Это означает, что возможны различия в развитии БПК после I-й стадии: оно может развиваться либо линейно, либо с ускорением при фиксировании II-й стадии БПК. С учетом этих критериев необходимо проанализировать все случаи фиксации развития БПК по КЭ в длительных экспериментах.

Выявленное визуальное развитие БПК по КЭ – это нереальная ситуация, несопоставимая с оцениваемой по БПК картиной окисления ОВ. Согласно классическим понятиям кинетики, БПК-тест оценивает последовательное окисление различных компонентов ОВ, а полученные кинетические характеристики для отдельных стадий процесса характеризуют условия окисления именно различных фракций ОВ (или компонентов, включающих различные соединения биогенных элементов, в частности С и N). Поэтому определение значений кинетических параметров БПК по двум его значениям (ко времени t<sub>1</sub> и 2 t<sub>1</sub>) имеет ограничения: такой метод нельзя применять, если эти значения попадают на участки БПК-кривой, характеризующие разные стадии окисления компонентов ОВ.

Результаты экспериментов, в которых фиксируется развитие БПК по КЭ, можно использовать для проверки адекватности полученных значений кинетических констант по двум точкам [Готовцев, 2016]: для этого сначала следует оценить значения кинетических констант БПК по разным экспериментам и затем сравнить их с параметрами, вычисляемыми на основе традиционного классического анализа, для характеристики окисления ОВ на I-й стадии процесса (по E-типу) [Леонов, 1974]. Поэтому для анализа данных значения кинетических параметров БПК вычислялись по уравнениям (2)–(5) по двум значениям (при времени t<sub>1</sub> и 2 t<sub>1</sub>), снимаемым с БПК-кривых, в которых фиксировалось развитие БПК по КЭ. Затем вычисленные значения кинетических параметров БПК (k, БПК<sub>n</sub> и v<sub>1</sub>) для многих водоемов Карелии были сгруппированы по сезонам года и рассчитаны средние значения кинетических параметров для каждого из сезонов (табл. 1).

В результате для разных сезонов были установлены следующие диапазоны средних значений параметров: констант скорости процесса, k, в пределах 0,012–0,028 сут<sup>-1</sup>; БПК<sub>n</sub> – 6,7–8,1 мг O<sub>2</sub>/л; начальной скорости, v<sub>1</sub>, – 0,080–0,216 мг O<sub>2</sub>/(л × сут).

Наименьшие значения кинетических параметров БПК (k, БПК<sub>n</sub> и v<sub>1</sub>) приходились на зимний период, а более высокие наблюдались

Таблица 1. Кинетические параметры процесса БПК и отношения с косвенными показателями содержания ОВ в природных водах (при 20 °С)

Table 1. BOD kinetic parameters and their ratio with parameters of organic matter content in natural waters (at 20 °C)

Сезон Season	ХПК, мг О <sub>2</sub> /л COD, mg O <sub>2</sub> /l	БПК <sub>n</sub> , мг О <sub>2</sub> /л BOD <sub>n</sub> , mg O <sub>2</sub> /l	$k$ , сут <sup>-1</sup> $k$ , day <sup>-1</sup>	$t_{1/2}^*$ , сут $t_{1/2}^*$ , day	$V_1$ , мг О <sub>2</sub> (л×сут) $V_1$ , mg O <sub>2</sub> (l×day)	$\gamma$	БПК <sub>n</sub> , ХПК мг О <sub>2</sub> мг О BOD <sub>n</sub> COD mg O <sub>2</sub> mg O	БПК <sub>n</sub> ** мг ОВ мг О <sub>2</sub> мг BOD <sub>n</sub> ** мг ОМ <sub>1</sub> mg O <sub>2</sub> mg
Зима Winter	24,6	6,7	0,012	58	0,080	1,82	0,25	0,33
Весна Spring	23,5	7,8	0,020	35	0,156	1,93	0,34	0,45
Лето Summer	25,8	7,7	0,028	25	0,216	2,48	0,40	0,53
Осень Autumn	28,5	8,1	0,019	36	0,154	2,36	0,32	0,43
Год Year	25,6	7,6	0,021	33	0,160	2,15	0,33	0,44
Оз. Святозеро, лето, 2012 г. Lake Svyatozero, summer 2012	35,3	48,1	0,032	22	1,539	1,47	1,36	1,81

Примечание. \* $t_{1/2}$  – время потребления половины запаса О<sub>2</sub>; \*\*среднесезонные значения по всем объектам (за исключением оз. Онежское);  $\gamma$  – температурный коэффициент;  $m$  – коэффициент, указывающий тип ОВ.

Note. BOD<sub>n</sub> – the ultimate biochemical oxygen demand;  $k$  – the rate constant;  $V_1$  – the reaction instant rate, COD – chemical oxygen demand; OM – organic matter.

\* $t_{1/2}$  – O<sub>2</sub> half-life time; \*\*all water objects (except Lake Onego) seasonal mean values;  $\gamma$  – temperature coefficient;  $m$  – organic matter type coefficient.

летом. Этому есть объяснение: зимой ОВ природных вод достаточно трансформировано, не происходит его новообразования за счет фотосинтеза и, как следствие, наблюдаются пониженные скорости окислительной трансформации ОВ и значений его косвенных показателей.

Таким образом, длительное развитие БПК по Е-типу характеризуют относительно низкие значения констант скорости процесса при повышенных величинах О<sub>2</sub>, потребляемого за такой период (или значения БПК<sub>n</sub> на пределе его фактического содержания в исследуемых водах).

Для экспериментов с водой из оз. Онежское, в которых отмечено развитие БПК по КЭ в течение 0–70 сут, оцененные значения кинетических параметров БПК при 20 °С составляли  $k = 0,078$  сут<sup>-1</sup>, БПК<sub>n</sub> = 2,98 мг О<sub>2</sub>/л и  $v_1 = 0,222$  мг О<sub>2</sub>/(л × сут), а при 10 °С –  $k = 0,037$  сут<sup>-1</sup>, БПК<sub>n</sub> = 1,47 мг О<sub>2</sub>/л, и  $v_1 = 0,054$  мг О<sub>2</sub>/(л × сут). Время потребления половины запаса О<sub>2</sub> составляло 58 сут для зимы и гораздо меньше для остальных сезонов (25–36 сут). На фоне всех водных объектов значительно выделяется эвтрофное оз. Святозеро. Летом 2012 г., когда в водоеме наблюдалось цвете-

ние воды, были получены самые высокие значения кинетических параметров БПК ( $k = 0,032$  сут<sup>-1</sup>, БПК<sub>n</sub> = 48,1 мг О<sub>2</sub>/л и  $v_1 = 1,539$  мг О<sub>2</sub>/(л × сут)) и самое низкое время (22 сут) потребления половины запаса О<sub>2</sub>. Одновременно для этого озера были установлены повышенные концентрации в воде общего автохтонного ОВ (9,3 мг С/л), его взвешенной формы (6,3 мг С/л, или 68 %), углеводов (общими и свободными 11,0 и 4,4 мг/л соответственно) и липидов (0,97 мг/л) [Зобкова и др., 2015]. Это указывает на соответствие между оцененными значениями кинетических параметров БПК ( $k$ , БПК<sub>n</sub>,  $v_1$ ) и характеристиками ОВ.

По соотношению БПК<sub>n</sub> : ХПК можно оценить количество О<sub>2</sub>, которое расходуется на окисление единицы массы ОВ. В зимний период отмечено самое низкое соотношение БПК<sub>n</sub> : ХПК (0,25 мг О<sub>2</sub>/мг О), а в период открытой воды оно колебалось от 0,32 до 0,40 (табл. 1). В водах высокотрофного оз. Святозеро летом 2012 г. это соотношение достигало 1,4, что вызвано ухудшением режима О<sub>2</sub> вследствие цветения воды в водоеме.

С помощью классического метода анализа, основанного на рассмотрении кинетики

процесса [Эммануэль, Кнорре, 1984], были предварительно оценены результаты 33 экспериментов этой серии за 2012–2016 гг. – с пробами воды из озер Яндомозеро, Онежское (центральный плес, Петрозаводская губа), Ладожское (на выходе из шхер Сортавалы, вблизи о. Валаам и зал. Хиденселькя) и р. Шуи в различные сезоны года [Леонов и др., 2018]. Для экспериментов при 20 °С оцененные значения кинетических параметров БПК, развивающегося по Е-типу, составляли: для периода зимы –  $k = 0,122 \text{ сут}^{-1}$ ,  $\text{БПК}_n = 2,55 \text{ мг О}_2/\text{л}$  и  $v_1 = 0,339 \text{ мг О}_2/(\text{л} \times \text{сут})$ ; весны –  $k = 0,117 \text{ сут}^{-1}$ ,  $\text{БПК}_n = 1,36 \text{ мг О}_2/\text{л}$  и  $v_1 = 0,159 \text{ мг О}_2/(\text{л} \times \text{сут})$ ; осени –  $k = 0,126 \text{ сут}^{-1}$ ,  $\text{БПК}_n = 1,04 \text{ мг О}_2/\text{л}$  и  $v_1 = 0,131 \text{ мг О}_2/(\text{л} \times \text{сут})$ ; при 10 °С значения  $k$  для периодов зимы, весны и осени составляли соответственно 0,140; 0,094 и 0,138  $\text{сут}^{-1}$ ,  $\text{БПК}_n$  – 0,59; 0,63 и 0,79  $\text{мг О}_2/\text{л}$  и  $v_1$  – 0,087; 0,059; 0,121  $\text{мг О}_2/(\text{л} \times \text{сут})$  [Леонов и др., 2018].

Таким образом, вычисленные по КЭ для разных сезонов значения параметров кинетики БПК не соответствуют характеристикам окисления ОВ на I-й стадии процесса: значения  $k$  почти на порядок ниже, и поэтому итоговые величины  $v_1$  нельзя использовать для характеристики скоростей БПК на окисление имеющих в воде фракций ОВ. Этот вывод – свидетельство нереальности развития БПК по длительной экспоненте (или по КЭ) на I-й стадии процесса. Однако полученные результаты не отрицают возможности вычисления параметров процесса по двум точкам (в этом случае два значения времени должны «попадать» в I-ю стадию процесса).

Проведенный анализ показал, что повышенные концентрации аллохтонного ОВ в исследуемых водах могут влиять на кинетику БПК и объяснять случаи формирования КЭ продолжительностью до 30–80 сут. В то же время БПК-данные, вычисленные по КЭ, нельзя использовать для корректной оценки расхода  $\text{О}_2$  на окисление лабильных фракций ОВ. В таких случаях устанавливаемое по кинетике БПК значение  $\text{БПК}_n$  в 2–3 раза выше значения  $\text{БПК}_{20}$  (именно оно традиционно принимается за  $\text{БПК}_n$ , расходуемое на окисление лабильных фракций ОВ).

Температурная зависимость скорости окисления ОВ может быть отражена температурным коэффициентом  $\gamma$ , который рассчитывается по формуле:

$$\ln[(v_1)_{T_2}/(v_1)_{T_1}] = [(T_2 - T_1)/10] \times \ln \gamma,$$

где  $(v_1)_{T_2}$  и  $(v_1)_{T_1}$  – скорости при температурах  $T_2$  и  $T_1$  соответственно. Если  $T_2 = 20 \text{ °С}$  и  $T_1 = 10 \text{ °С}$ , то  $\gamma = (v_1)_{20}/(v_1)_{10}$ . Необходимо отметить особенность расчета  $\gamma$  для биохими-

ческого окисления ОВ в природных водах. Для химических реакций его можно рассчитать по значениям скоростей процесса, а также по оцененным константам скорости. Чтобы охарактеризовать процесс БПК, значение  $\gamma$  можно вычислить только по скоростям процесса. Дело в том, что температурные зависимости для  $[\text{БПК}_n]$  и  $k$  несколько иные, чем для  $v_1$ . Это связано с тем, что  $k$  не является характеристикой отдельной реакции, а отражает совокупность реакций, связанных с потреблением  $\text{О}_2$  различными веществами. Значения  $[\text{БПК}_n]$  не являются показателями содержания ОВ, а отражают количество  $\text{О}_2$ , которое расходуется на окисление ОВ за длительный период времени. Также важно, как оцениваются значения кинетических параметров процесса БПК по результатам экспериментов. Используя температурный коэффициент  $\gamma$ , с учетом среднесезонной температуры воды в водоемах ( $T$ ), можно найти истинную скорость трансформации ОВ, характерную для каждого из сезонов:

$$(v_{20}/v_T) = \gamma^{(20-T)/10}$$

и

$$v_T = v_{20}/\gamma^{(20-T)/10}.$$

Если рассмотреть температурную зависимость скорости потребления  $\text{О}_2$ , затрачиваемого на биохимическое окисление ОВ, то среднее значение температурного коэффициента  $\gamma$  по всем водоемам было наименьшим зимой, а в период открытой воды увеличивалось от весны к лету, снижаясь осенью (табл. 1).

Полученные значения скорости окисления ОВ при температурах  $< 20 \text{ °С}$  могут отражать истинную картину трансформации ОВ в водных объектах. Наибольшие скорости окисления ОВ отмечаются летом (активно идет его новообразование за счет фотосинтеза и наиболее высоких температур водной среды), наименьшее – зимой (при достаточно сильной трансформированности ОВ, отсутствии его новообразования и низкой температуры воды).

Итог анализа типов БПК-кривых (и их соответствия классификациям 1 и 2) – объединенные таблицы 2 и 3, в которых представлены статистические характеристики по встречаемым типам мультистадийных БПК-кривых в экспериментах с водой из водоемов Карелии и Белого моря. Таблица 2 включает результаты анализа 102 экспериментов при 20 °С (100 совместно с 10 °С и 2 – только при 20 °С) и таблица 3 – 108 экспериментов при 10 °С (100 совместно с 20 °С и 8 – с 2 °С).

Наиболее часто при 20 °С встречались мультистадийные кривые EL-, EAL-, AL- и AAL-ти-

Таблица 2. Статистические данные встречаемости различных типов БПК-кривых, полученные в ходе экспериментов при 20 °С в разные сезоны 2012–2017 гг.

Table 2. Statistical data of BOD curve abundance in 20 °С experiments at different seasons of 2012–2017

Тип БПК-кривых BOD curve types	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn	$\Sigma_T$
EL	$\frac{9(36,0)}{[30,0]}$	$\frac{2(8,0)}{[5,9]}$	$\frac{9(36,0)}{[52,9]}$	$\frac{2(8,0)}{[50,0]}$	$\frac{1(4,0)}{[9,1]}$	$\frac{2(8,0)}{[33,2]}$	$\frac{5(20,0)}{[26,4]}$	$\frac{8(32,0)}{[29,6]}$	$\frac{7(28,0)}{[25,0]}$	$\frac{5(20,0)}{[17,9]}$	$\frac{25(100)}{[24,5]}$
AL	$\frac{6(28,5)}{[20,0]}$	$\frac{8(38,1)}{[23,5]}$	$\frac{3(14,3)}{[17,6]}$	$\frac{1(4,8)}{[25,0]}$	$\frac{2(9,5)}{[18,2]}$	$\frac{1(4,8)}{[16,7]}$	$\frac{4(19,1)}{[21,0]}$	$\frac{4(19,1)}{[14,8]}$	$\frac{7(33,3)}{[25,0]}$	$\frac{6(28,5)}{[21,4]}$	$\frac{21(100)}{[20,6]}$
EA	$\frac{1(16,7)}{[3,3]}$	$\frac{4(66,6)}{[11,8]}$	–	–	–	$\frac{1(16,7)}{[16,7]}$	$\frac{3(50,0)}{[15,8]}$	$\frac{3(50,0)}{[11,1]}$	–	–	$\frac{6(100)}{[5,9]}$
AA	$\frac{3(50,0)}{[10,0]}$	$\frac{2(33,3)}{[5,9]}$	–	–	–	$\frac{1(16,7)}{[16,7]}$	–	$\frac{1(16,7)}{[3,7]}$	$\frac{5(83,3)}{[17,8]}$	–	$\frac{6(100)}{[5,9]}$
EAL	$\frac{4(17,4)}{[13,3]}$	$\frac{8(34,8)}{[23,5]}$	$\frac{3(13,1)}{[17,6]}$	$\frac{1(4,3)}{[25,0]}$	$\frac{6(26,1)}{[54,5]}$	$\frac{1(4,3)}{[16,7]}$	$\frac{4(17,4)}{[21,0]}$	$\frac{9(39,2)}{[33,4]}$	$\frac{5(21,7)}{[17,8]}$	$\frac{5(21,7)}{[17,9]}$	$\frac{23(100)}{[22,5]}$
AAL	$\frac{7(35,0)}{[23,4]}$	$\frac{9(45,0)}{[26,5]}$	$\frac{2(10,0)}{[11,9]}$	–	$\frac{2(10,0)}{[18,2]}$	–	$\frac{3(15,0)}{[15,8]}$	$\frac{2(10,0)}{[7,4]}$	$\frac{3(15,0)}{[10,8]}$	$\frac{12(60,0)}{[42,8]}$	$\frac{20(100)}{[19,6]}$
A	–	$\frac{1(100)}{[2,9]}$	–	–	–	–	–	–	$\frac{1(100)}{[3,6]}$	–	$\frac{1(100)}{[1,0]}$
$\frac{\Sigma_T}{\Sigma_B}$	$\frac{30(29,4)}{30[100]}$	$\frac{34(33,3)}{34[100]}$	$\frac{17(16,7)}{17[100]}$	$\frac{4(3,9)}{6[100]}$	$\frac{11(10,8)}{11[100]}$	$\frac{6(5,9)}{6[100]}$	$\frac{19(18,6)}{19[100]}$	$\frac{27(26,4)}{27[100]}$	$\frac{28(27,5)}{28[100]}$	$\frac{28(27,5)}{28[100]}$	$\frac{102(100)}{102[100]}$

Примечание. Здесь и в табл. 3: в круглых скобках указан процент, рассчитанный от общей встречаемости в строках  $\Sigma_T$  (100 %); в квадратных скобках указан процент, рассчитанный от общей встречаемости в столбцах  $\Sigma_B$  (100 %).

Note. Here and in Table 3: the percent calculated from the total abundance in rows  $\Sigma_T$  (100 %) is given in round brackets, the percent calculated from the total abundance in columns  $\Sigma_B$  (100 %) is given in square brackets.

Таблица 3. Статистические данные встречаемости различных типов БПК-кривых, полученные в ходе экспериментов при 10 °С в разные сезоны 2012–2017 гг.

Table 3. Statistical data of BOD curve abundance in 10 °С experiments at different seasons of 2012–2017

Тип БПК-кривых BOD curve types	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn	$\Sigma_T$
EL	$\frac{6(21,4)}{[21,4]}$	$\frac{9(32,2)}{[26,5]}$	$\frac{4(14,3)}{[23,5]}$	$\frac{5(17,9)}{[45,4]}$	$\frac{2(7,1)}{[16,7]}$	$\frac{2(7,1)}{[33,3]}$	$\frac{6(21,4)}{[31,6]}$	$\frac{11(39,3)}{[39,3]}$	$\frac{6(21,4)}{[21,4]}$	$\frac{5(17,9)}{[15,6]}$	$\frac{28(100)}{[25,9]}$
AL	$\frac{13(34,2)}{[46,5]}$	$\frac{12(31,5)}{[35,3]}$	$\frac{4(10,5)}{[23,5]}$	$\frac{2(5,3)}{[18,2]}$	$\frac{5(13,2)}{[41,6]}$	$\frac{2(5,3)}{[33,3]}$	$\frac{8(21,0)}{[36,8]}$	$\frac{7(18,4)}{[27,7]}$	$\frac{11(29,0)}{[39,3]}$	$\frac{12(31,6)}{[37,5]}$	$\frac{38(100)}{[35,2]}$
EA	–	$\frac{3(100,0)}{[8,8]}$	–	–	–	–	–	$\frac{2(75,0)}{[6,9]}$	–	$\frac{1(25,0)}{[3,1]}$	$\frac{3(100)}{[2,8]}$
AA	–	$\frac{1(50,0)}{[2,9]}$	–	–	–	$\frac{1(50,0)}{[20,0]}$	$\frac{1(50,0)}{[5,3]}$	$\frac{1(50,0)}{[3,4]}$	–	–	$\frac{2(100)}{[1,9]}$
EAL	$\frac{7(31,8)}{[25,0]}$	$\frac{5(22,7)}{[14,7]}$	$\frac{5(22,7)}{[29,5]}$	$\frac{2(9,1)}{[18,2]}$	$\frac{2(9,1)}{[16,7]}$	$\frac{1(4,6)}{[20,0]}$	$\frac{4(18,2)}{[21,0]}$	$\frac{5(22,7)}{[17,2]}$	$\frac{6(27,3)}{[21,4]}$	$\frac{7(31,8)}{[21,9]}$	$\frac{22(100)}{[20,4]}$
AAL	$\frac{2(13,3)}{[7,1]}$	$\frac{4(26,7)}{[11,8]}$	$\frac{4(26,7)}{[23,5]}$	$\frac{2(13,3)}{[18,2]}$	$\frac{3(20,0)}{[25,0]}$	–	$\frac{1(6,7)}{[5,3]}$	$\frac{2(13,3)}{[6,9]}$	$\frac{5(33,3)}{[17,9]}$	$\frac{7(46,7)}{[21,9]}$	$\frac{15(100)}{[13,8]}$
$\frac{\Sigma_T}{\Sigma_B}$	$\frac{28[100]}{26(25,9)}$	$\frac{34[100]}{34(31,5)}$	$\frac{17[100]}{17(15,7)}$	$\frac{11[100]}{11(10,2)}$	$\frac{12[100]}{12(11,1)}$	$\frac{6[100]}{6(5,6)}$	$\frac{20[100]}{20(18,5)}$	$\frac{28[100]}{28(25,9)}$	$\frac{28[100]}{28(25,9)}$	$\frac{32[100]}{32(29,7)}$	$\frac{108[100]}{108(100)}$

пов, на них в сумме приходилось 87,2 % экспериментов (25, 21, 23 и 20 % соответственно), а при 10 °С – AL-, EL-, EAL- и AAL-типов, на них суммарно приходилось 95,3 % экспериментов (38, 28, 22 и 15 % соответственно). Информация в таблицах 2 и 3 показывает фактическую

и относительную встречаемость разных типов БПК-кривых в экспериментах, выполненных в разные сезоны 2012–2017 гг.

Учитывая многообразие типов кривых БПК, выявленных в результате текущего и проведенных ранее [Леонов, 1974] исследований,

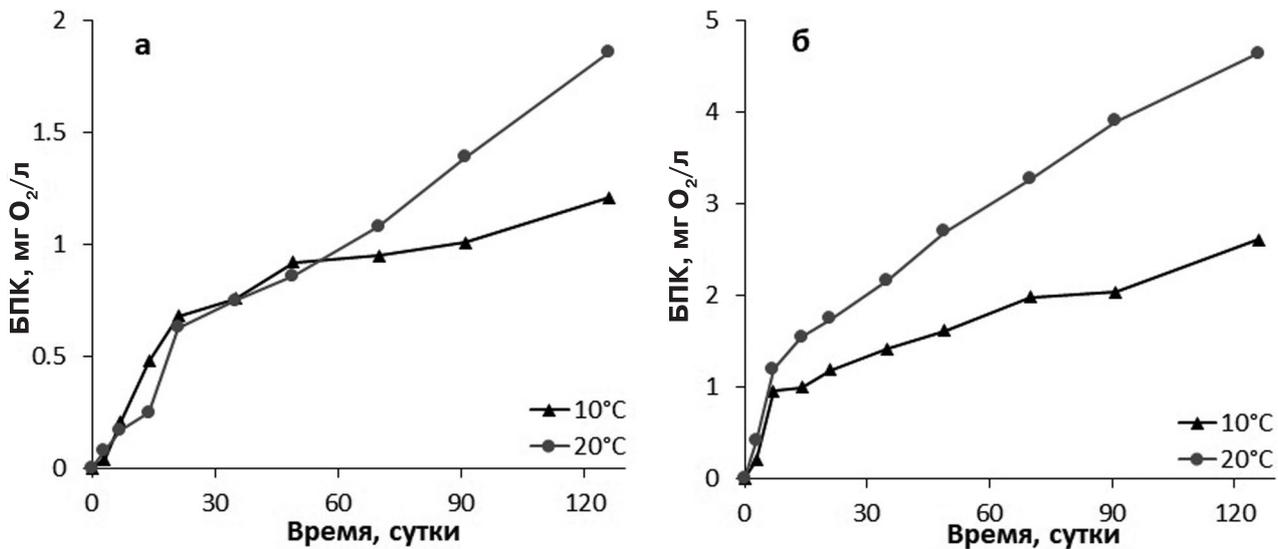


Рис. 12. Развитие БПК при 10 и 20 °С с равной активностью на I-й стадии в: (а) – центральной части оз. Онежское весной 2017 г. и (б) – оз. Каменное зимой 2013 г.

Fig. 12. BOD kinetic at 10 and 20 °C with equal activity at the first stage: (a) – the central part of Lake Onego in spring 2017 and (б) – Lake Kamennoe in winter 2013

применение идеализированного подхода к анализу развития БПК по двум точкам исключительно по экспоненциальному закону (с возможностью коррекции на краткую задержку процесса в первые 0,25 сут), представленного в ряде работ А. В. Готовцева, включая монографию [Готовцев, 2018], является некомпетентным. В этих работах развитие БПК оценивается на абстрактном понимании сути процесса, не учитывая разнообразие типов мультистадийных БПК-кривых. Такой подход исключает возможность объяснения причин наблюдаемой кинетики БПК в водах разных объектов и не дает корректной оценки значений кинетических параметров БПК, а потому не может быть полезен ни в фундаментальных, ни в прикладных исследованиях состояния водных ресурсов и при мониторинге процессов формирования качества природных вод.

Разнообразие типов экспериментальных БПК-кривых – это свидетельство особенностей кинетики БПК, взаимосвязанной со значениями и изменениями во времени как косвенных показателей содержания ОВ, так и концентраций его отдельных компонентов в исследуемых пробах воды. Например, в весенней воде практически во всех районах Онежского озера повышены значения показателей ОВ, именно в этот период активно развивается диатомовый фитопланктон [Теканова, Syarki, 2015], увеличены в воде концентрации хлорофилла *a*, значения косвенных показателей ОВ, его автохтонной массы и биохимических компонентов (углеводы, липиды, белки) [Ефремова и др., 2013]. Особенно

активно развивается фитопланктон в акваториях Кондопожской и Петрозаводской губ, гидрохимический режим которых находится под влиянием крупных притоков и поступления сточных вод. Акватория Петрозаводской губы включает мезотрофные воды, весной они характеризуются повышенной гумусностью и высокой долей аллохтонной органической массы, за счет влияния вод р. Шуи [Sabylina et al., 2010]. Воды Кондопожской губы находятся под воздействием сточных вод промцентра, стока р. Суны и соответствуют в целом мезотрофному (а в верхней части – эвтрофному) типу вод. Весной во внешней части губы в воде доминирует автохтонное ОВ [Ефремова и др., 2013].

При существующем разнообразии внешних факторов, определяющих нагрузку на водоемы по различным компонентам ОВ, и формировании, соответственно, различной реакции экосистем водоемов на поступление ОВ из внешних источников возникает естественный вопрос: как следует проводить эксперименты по изучению окисления различных органических фракций в водах гумидной зоны (например, водных объектов Карелии)? В этой серии экспериментальных исследований было показано, что развитие I-й стадии БПК, связанной с окислением автохтонного ОВ, очень часто происходит довольно интенсивно при разных температурах (при 20, 10 и даже при 2 °С) (рис. 12).

Таким образом, нельзя исключать, что значения кинетических параметров I-й стадии при 10 °С в некоторых случаях будут близки к экспериментальным условиям при 20 °С, а II-я ста-

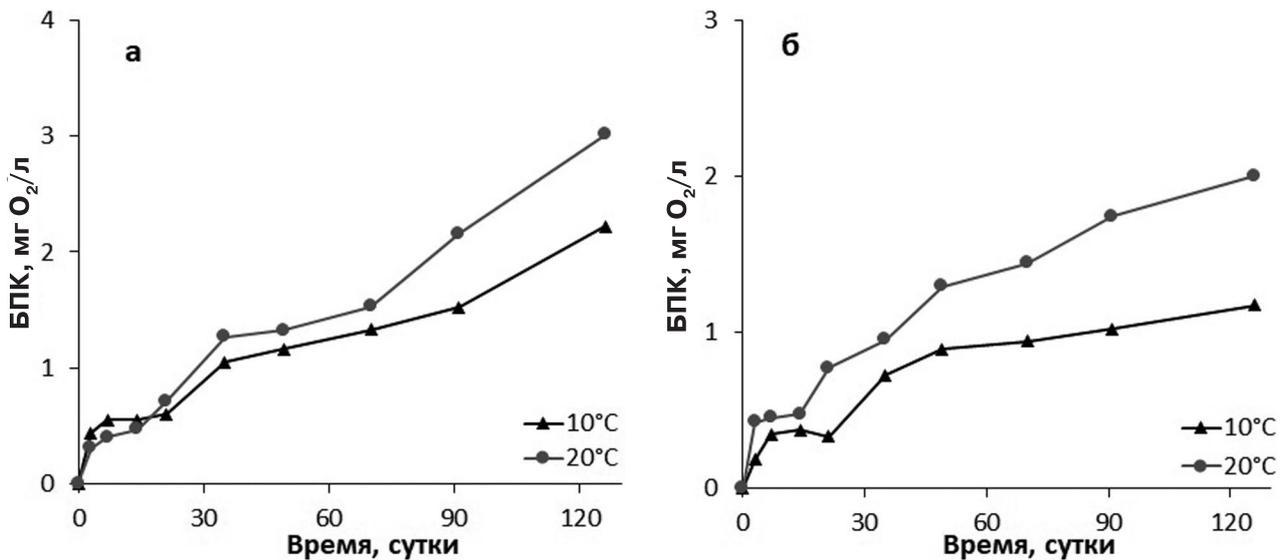


Рис. 13. Развитие БПК при 10 и 20 °С с равной активностью на I-й и II-й стадиях и с разными скоростями на L-стадии в оз. Ладожское, 2014 г.: (а) – весной и (б) – осенью

Fig. 13. BOD kinetic at 10 and 20 °C with the equal activity at first and second stages and different rate in L-stage, Lake Ladoga, 2014: (a) – spring and (б) – autumn

для окисления компонентов ОВ будет развиваться более интенсивно при 20 °С в сравнении с условиями окисления при 10 °С. Очевидно, что наличие экспериментальных данных по БПК при 10 °С служит надежным ориентиром для определения исходных параметров (в частности, значения  $BPK_n$ ) для последующего кинетического анализа экспериментальных данных при 20 °С. Как отмечалось выше, оценка  $BPK_n$  также не исключается путем подбора значений во время вычислений. Имеются также случаи, когда I-я и II-я стадии БПК одинаково активны при разных температурах (рис. 13).

Следует отметить, что в этой серии работ в значительном количестве экспериментов фиксировались случаи недостатка растворенного O<sub>2</sub> для окисления ОВ из-за его высокого содержания. Один случай был зафиксирован после I-й стадии (на 20-е сут эксперимента), а в некоторых случаях – на II-й стадии (с образованием EA-типов БПК-кривых). Полное истощение растворенного O<sub>2</sub> в воде останавливает развитие БПК, при этом невозможно достоверно оценить значения кинетических параметров. Очевидно, что такие эксперименты следует повторять с разным разбавлением исходной воды или отстоявшейся «старой» водой из того же водоема. Следует обратить внимание на тот факт, что при изучении водоемов высокого трофического статуса (озера Святозеро и Крошнозеро) аналогичный метод с использованием отстоявшейся «старой» воды был успешно протестирован.

Возможное объяснение особенностей развития БПК можно показать на примере про-

веденного ранее описания трансформации соединений С, N, P и БПК с помощью математической модели [Леонов, Айзатуллин, 1977] и экспериментальных данных [Canale, Cheng, 1974]. В экспериментах при 25 °С фиксировались изменения концентрации растворенного органического вещества (РОВ) – углеводов (смесь сахарозы и цериофильного экстракта при достаточно высоком содержании биогенных веществ) и БПК бактериями *Aerobacter aerogenes* и простейшими *Tetrahymena pyriformis* (вид D). Начальные концентрации РОВ составляли в экспериментах 60 мг С/л (система 1 – водная среда с бактериями, рис. 14, а) и 30 мг С/л (система 2 – водная среда с бактериями и простейшими, рис. 14, б). Начальные концентрации соединений P в системах 1 и 2, соответствующие прослеживаемой в экспериментах картине трансформации РОВ и развития БПК, были оценены с помощью численных экспериментов.

Из анализа результатов моделирования можно выявить некоторые особенности развития БПК (рис. 14). Во-первых, потребление O<sub>2</sub> бактериями ( $BPK_B$ ) (развивается по EL-типу) в одинаковой степени отражает картину трансформации РОВ: в системах 1 и 2 основная масса РОВ трансформируется за 0,5–1,0 сут при возрастании исходной биомассы бактерий на ~ 2 порядка.

Во-вторых, значения РОВ на рис. 14 представлены суммой двух фракций ОВ – исходной лабильной ( $C_L$ ) и метаболизированной ( $C_M$ ), последняя представляет собой продукт метаболизма при биотрансформации исход-

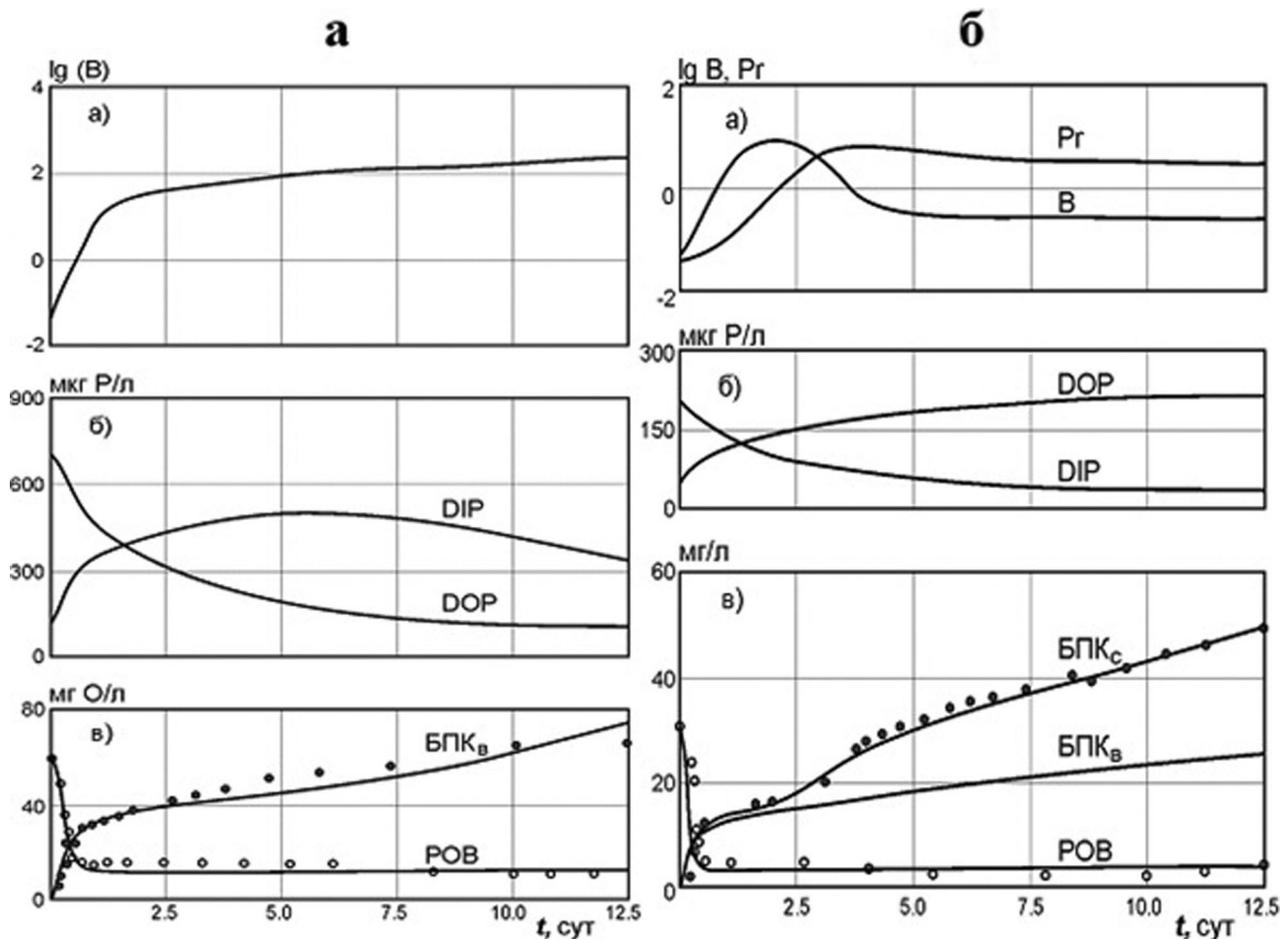


Рис. 14. Моделирование трансформации РОВ и БПК в водной среде с бактериями (а) и совместно с бактериями и простейшими (б) по экспериментальным (точки) [Canale, Cheng, 1974] и расчетным [Леонов, Айзатуллин, 1977] данным (кривыми)

Fig. 14. Modeling of dissolved OM transformation and BOD in water with bacteria (a) and bacteria and archaeal together (b) by experimental (dots) [Canale, Cheng, 1974] and simulated [Leonov, Aizatullin, 1977] data (curves)

ной фракции  $C_L$ . Доли  $C_L$  и  $C_M$  в системах 1 и 2 во времени распределены по-разному: через 1-е сут в системе 1 остается  $\sim 0,8$  мг С/л, или 1,3 % исходного  $C_L$ , а в системе 2  $\sim 0,2$  мг С/л (0,6 %), тогда как содержание  $C_M$  в системах 1 и 2 составляет соответственно 8,6 и 3,3 мг С/л (или 14,3 и 10,9 %). Суммарное содержание РОВ после  $\sim 1$  сут в системах 1 и 2 практически остается постоянным. Расчеты показывают, что пополнение запасов  $C_L$  после 1-х сут происходит за счет распада детрита. Постоянство концентрации РОВ создает иллюзию «стойкости» РОВ, остающегося в системах 1 и 2, однако это результат баланса процессов расходования  $C_L$  и пополнения его запасов при распаде детрита. Таким образом, развитие  $БПК_B$  по ЕL-типу соответствует представлениям о биотрансформации ОВ, при котором I-я стадия БПК развивается активно, а II-я – медленно (описываются соответственно экспоненциальным и линейным уравнениями). При этом важно, что

развитие II-й стадии биотрансформации РОВ не может оцениваться по динамике его концентраций, а может быть охарактеризовано только на основании кинетики БПК.

В-третьих, общее потребление  $O_2$  в системе 2 ( $БПК_C$ ) развивается по EAL-типу: активизация II-й стадии БПК целиком определяется активностью простейших, которые строят свою биомассу только за счет потребления биомассы бактерий. Таким образом, одинаковые по внешнему виду мультистадийные БПК-кривые в экспериментах могут быть результатом развития как химических процессов окисления разных фракций ОВ, отличающихся по стойкости к биоокислению, так и биологических процессов – последовательного развития биомасс разных групп организмов, потребляющих разные субстраты. Очевидно, что основные причины формирования разных типов кривых БПК могут быть объяснены только в случае проведения в экспериментах дополнительных ана-

литических определений биомасс организмов и концентраций разных фракций ОВ, которые потенциально могут участвовать в исследуемых окислительных процессах.

Кроме того, по изменению концентраций форм Р – растворенных органического (DOP) и неорганического (DIP) – можно видеть отличия в направлениях их трансформации в системах 1 и 2. Общая удельная скорость утилизации Р-содержащих субстратов на единицу биомассы бактерий на 2,5–3 порядка выше в системе 2, чем в 1, так как простейшие поддерживают биомассу бактерий ниже на ~1 порядок значений, когда бактерии способны активно потреблять имеющиеся в водной среде субстраты.

## Заключение

Для характеристики развития БПК в длительных экспериментах (до 84–126 сут) использовались две классификации экспериментальных типов БПК-кривых. Первая была предложена более 40 лет назад при обобщении многочисленных данных по БПК в разных типах вод, а вторая – при визуальном сравнении типов развития БПК в экспериментах с водой из водоемов Карелии. На основе этих двух классификаций были идентифицированы шесть типов развития БПК: экспоненциально-линейный (EL-тип), автокаталитически-линейный (AL-тип), экспоненциально-автокаталитический (EA-тип), полиавтокаталитический (AA-тип), экспоненциально-автокаталитически-линейный (EAL-тип) и полиавтокаталитически-линейный (тип AAL). При 20 °С наиболее часто встречались мультистадийные кривые EL-, EAL-, AL- и AAL-типа, вместе они составляли 88,1 % всех экспериментов этой серии, а при 10 °С – AL-, EL-, EAL- и AAL-типа, на которые приходилось 95,3 %. EA- и AA-типы характерны для экспериментов, в которых отмечен полный расход растворенного О<sub>2</sub> в исследуемой воде. Мультистадийное развитие БПК отмечено до конца длительных экспериментов при сохранении остаточных концентраций растворенного О<sub>2</sub> в исследуемой воде.

Во многих экспериментах с водой из водоемов Карелии регистрировалось развитие БПК по КЭ продолжительностью в разных случаях 30–80 сут. Кинетические параметры БПК ( $k$ , БПК<sub>п</sub> и  $v_1$ ), оцененные для КЭ в разные сезоны, варьировали в пределах:  $k$  – 0,012–0,028 сут<sup>-1</sup>, БПК<sub>п</sub> = 6,7–8,1 мг О<sub>2</sub>/л и  $v_1$  = 0,065–0,250 мг О<sub>2</sub>/(л × сут). Наименьшие значения выпадали на зимний период, а наибольшие – на летний.

Анализ данных показал, что значения кинетических параметров БПК, рассчитанные

по КЭ, не являются характеристиками содержания в воде лабильных фракций автохтонного ОВ. На I-й стадии процесса значения  $k$  почти на порядок ниже, БПК<sub>п</sub> показывают почти полное истощение О<sub>2</sub> в исследуемой воде, и поэтому  $v_1$  нельзя использовать для полной характеристики скоростей БПК для окисления лабильных фракций ОВ. Эти данные свидетельствуют о нереальном развитии БПК по КЭ и объясняются следствием слияния еще не завершеного развития БПК на I-й стадии (по E-типу) с начавшимся активным развитием II-й стадии (по A-типу) без образования плато на БПК-кривой между этими стадиями. Параллельно выполненные эксперименты при 20 и 10 °С во многих случаях показывают отличия в условиях развития БПК на окисление компонентов автохтонного ОВ. Однако фиксируются отдельные случаи равнозначно активного развития БПК не только на I-й стадии процесса, но одновременно и на I-й, и на II-й стадиях.

В этой серии экспериментов по БПК установлено многообразие возможных вариантов развития процесса в водной среде из разных водоемов Карелии. Это в значительной степени может быть связано с разнообразием форм нахождения разных фракций ОВ в природных водах гумидной зоны, а также с различным антропогенным воздействием на природные водоемы (сбросы жидких хозяйственно-бытовых сточных вод непосредственно в природные водные объекты). Поэтому целью дальнейших исследований является оценка соответствия между кинетикой процессов БПК, составом ОВ в исследуемых водах и антропогенным воздействием на водные экосистемы. Планируется установить количественные показатели, характеризующие кинетические параметры БПК, определяющие условия разложения компонентов ОВ в различающихся по концентрации и составу ОВ, состоянию и трофическому статусу водоемах Карелии.

*Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН за выполнение масштабных, трудоемких полевых и лабораторных исследований по кинетике БПК. Особая благодарность сотруднице этой лаборатории О. И. Икко за подготовку общей подборки результатов экспериментов.*

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН) и Института океанологии им. Ширшова РАН (тема № 0149-2018-0015).*

## Литература

Айзатуллин Т. А., Леонов А. В. Кинетика и механизм трансформации соединений фосфора и потребления кислорода в водной экологической системе (математическое моделирование) // Водные ресурсы. 1977. № 2. С. 41–55.

Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М. Кинетические закономерности разложения органических веществ (на примере притоков Рыбинского водохранилища) // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 111–149.

Готовцев А. В. Определение БПК и коэффициента скорости биохимического потребления кислорода: мониторинг, прямая и обратная задачи, формулы, расчеты и таблицы // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 6. С. 510–520. doi: 10.7868/S0321059616050060

Готовцев А. В. Оценка влияния ксенобиотиков на скорость разложения органических загрязнений. М.: Вода: химия и экология, 2018. 272 с.

Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Лозовик П. А. Лабильные органические вещества (углеводы, липиды и белки) в Онежском озере // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 98–104.

Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.

Каплин В. Т. Современное состояние и главные направления в изучении процессов трансформации химических веществ в природных водах // Материалы VI Всесоюзного симпозиума по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. Таллинн, 1979. Ч. 1. С. 3–17.

Леонов А. В. Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974. Т. 14, вып. 1. С. 82–87.

Леонов А. В. Изучение кинетики биохимического потребления кислорода в пробах атлантической воды // Океанология. 1977. Т. 17, вып. 2. С. 243–252.

Леонов А. В., Айзатуллин Т. А. Моделирование трансформации органических и неорганических веществ сообществом микроорганизмов в морской воде // Сб. Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений. Тр. ГОИН. 1977. № 128. С. 105–149.

Леонов А. В., Бердавцева Л. Б. Оценка процессов разложения органического вещества по кинетическим параметрам БПК (на примере Можайско-

го водохранилища) // Водные ресурсы. 1986. № 4. С. 111–127.

Леонов А. В., Бердавцева Л. Б. Органическое вещество в воде Можайского водохранилища: оценка его трансформации по кинетическим параметрам БПК // Водные ресурсы. 1990. № 3. С. 63–80.

Леонов А. В., Лозовик П. А., Икко О. И. Использование экспериментальных данных по биохимическому потреблению кислорода для корректной оценки состояния водных объектов и качества природных вод // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 11–30. doi: 10.17076/lim726

Лозовик П. А., Ефремова Т. А., Сабылина А. В. Количественное определение содержания углеводов и липидов в поверхностных водах // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 57–62.

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

РД 52.24.420–2006. Биохимическое потребление кислорода в водах. Методика выполнения измерений скляночным методом. Ростов-на-Дону: ГХИ, 2006. 19 с.

РД 52.24.421–2012. Химическое потребление кислорода в водах. Методика измерений титриметрическим методом. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2012. 19 с.

Эмануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики М.: Высшая школа, 1984. С. 186–224.

Canale R. P., Cheng F. Y. Oxygen utilization in bacterial – protozoan community // J. Sanit. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Engrs. 1974. Vol. 100, no. 1. P. 171–185.

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // Freshwater Biol. 2009. Vol. 54. P. 1312–1323. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02183.x

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Onega Lake and its tributaries // Water Resources. 2010. Vol. 37, no. 6. P. 842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102

Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A. Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon // Chem. Geol. 2010. Vol. 269. P. 12–21. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.08.007

Tekanova E. V., Syarki M. T. Peculiarities of phenology of the primary production process in the pelagic zone of Lake Onega // Biol. Bull. 2015. Vol. 42, no. 6. P. 556–562. doi: 10.1134/S1062359015060114

Поступила в редакцию 27.12.2018

## References

Aizatullin T. A., Leonov A. V. Kinetika i mekhanizm transformatsii soedinenii fosfora i potrebleniya kisloroda v vodnoi ekologicheskoi sisteme (matematicheskoe modelirovanie) [Kinetics and mechanism of transformation of compounds of phosphorus and oxygen demand in the aquatic ecological system (mathematical modeling)]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 1977. No. 2. P. 41–55.

Bikbulatov E. S., Bikbulatova E. M. Kineticheskie zakonomernosti razlozheniya organicheskikh veshchestv (na primere pritokov Rybinskogo vodokhranilishcha) [Kinetics of organic matter decomposition (the case of the Rybinsk reservoir tributaries)]. *Formirovanie i dinamika polei gidrol. i gidrokhim. kharakteristik vo vnutr. vodoemakh i ikh modelirovanie* [Formation and dynamics of hydrol. and hydrochem. characteristics fields

in inland water bodies and their modeling]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. P. 111–149.

Gotovtsev A. V. Opredelenie BPK i koeffitsienta skorosti biokhimicheskogo potrebleniya kisloroda: monitoring, pryamaya i obratnaya zadachi, formuly, raschety i tablitsy [Determination of BOD and speed ratio biochemical oxygen demand: monitor, direct and inverse problems, formulas, calculations, and tables]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 2016. Vol. 43, no. 6. P. 633–647. doi: 10.7868/S0321059616050060

Gotovtsev A. V. Otsenka vliyaniya ksenobiotikov na skorost' razlozheniya organicheskikh zagryaznenii [Evaluation of xenobiotics effect on the rate of organic pollutants decomposition]. Moscow: Voda: himiya i ekologiya, 2018. 272 p.

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A. Labil'nye organicheskie veshchestva (uglevody, lipidy i belki) v Onezhskom ozere [Labile organic matter (carbohydrates, lipids and proteins) in Lake Onega]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2013. No. 6. P. 98–104.

Emanuel' N. M., Knorre D. G. Kurs khimicheskoi kinetiki [Chemical kinetics] Moscow: Vysshaya shkola, 1984. 463 p.

Kaplin V. T. Sovremennoe sostoyanie i glavnye napravleniya v izuchenii protsessov transformatsii khimicheskikh veshchestv v prirodnykh vodakh [Current state and main directions in the study of transformation processes of chemicals in natural waters]. *Mat. VI Vsesoyuz. simp. po sovr. probl. samoochishcheniya vodoemov i regulirovaniya kachestva vody* [Proceed. VI All-Union symp. on current problems of water bodies self-purification and water quality control]. Tallinn, 1979. Pt. 1. P. 3–17.

Leonov A. V. Obobshchenie, tipizatsiya i kineticheski analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov [The generalization, typification, and kinetic analysis of the curves of oxygen consumption according to the BOD-experiments]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1974. Vol. 14, iss. 1. P. 82–87.

Leonov A. V. Izuchenie kinetiki biokhimicheskogo potrebleniya kisloroda v probakh atlanticheskoi vody [Studies of kinetics of the biochemical oxygen consumption of oxygen in the Atlantic water samples]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1977. Vol. 17, iss. 2. P. 243–252.

Leonov A. V., Aizatullin T. A. Modelirovanie transformatsii organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv soobshchestvom mikroorganizmov v morskoi vode [Modeling of organic and inorganic substance transformations by microorganism community in marine water]. *Protsessy samoochishcheniya morskikh vod ot khim. zagryaznenii. Tr. GOIN* [Processes of sea water self-purification from chem. pollutants. Proceed. St. Oceanographic Inst.]. 1977. No. 128. P. 105–145.

Leonov A. V., Berdavitseva L. B. Otsenka protsessov razlozheniya organicheskogo veshchestva po kineticheskim parametram BPK (na primere Mozhaiskogo vodokhranilishcha) [Assessment of decomposition processes of organic matter in the BOD kinetic parameters (on the example of the Mozhaisk reservoir)]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 1986. No. 4. P. 111–127.

Leonov A. V., Berdavitseva L. B. Organicheskoe veshchestvo v vode Mozhaiskogo vodokhranilishcha: otsenka ego transformatsii po kineticheskim parametram

BPK [Organic matter in the water of the Mozhaisk reservoir: an evaluation of its transformation from the kinetic parameters of BOD]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 1990. No. 3. P. 63–80.

Leonov A. V., Lozovik P. A., Ikko O. I. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh po biokhimicheskomu potrebleniyu kisloroda dlya korrektnoi otsenki sostoyaniya vodnykh ob'ektov i kachestva prirodnykh vod [Using experimental data on biochemical oxygen demand for correct assessment of the status of water bodies and the quality of natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 11–30. doi: 10.17076/lim726

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dukhovicheva T. A., Osipova L. A. Allokhthonnoe i avtokhthonnoe organicheskoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh Karelii [Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters of Karelia]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 204–216.

Lozovik P. A., Efremova T. A., Sabylina A. V. Kolichestvennoe opredelenie sodержaniya uglevodov i lipidov v poverkhnostnykh vodakh [Quantitative determination of content of carbohydrates and lipids in surface waters]. *Vestnik of MGOU. Ser. Estestv. nauki* [Bull. Moscow Region St. Univ. Series: Nat. Sci.]. 2013. No. 3. P. 57–62.

RD 52.24.420–2006. Biokhimicheskoe potreblenie kisloroda v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii sklyanochnym metodom [Biochemical oxygen consumption in waters. The light-and-dark-bottle measurement procedure]. Rostov-na-Donu: GKHI, 2006. 19 p.

RD 52.24.421–2012. Khimicheskoe potreblenie kisloroda v vodakh. Metodika izmerenii titrimetricheskimi metodom [Chemical consumption of oxygen in waters. The measurement procedure by titrimetric method]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2012. 19 p.

Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V. Organicheskoe veshchestvo i ego komponenty v poverkhnostnykh vodakh gumidnoi zony [Organic matter and its components in surface waters of humid zone]. *Uspekhi sovr. estestvoznaniya* [Adv. in Current Nat. Sci.]. 2015. No. 12. P. 115–120.

Canale R. P., Cheng F. Y. Oxygen utilization in bacterial – protozoan community. *J. Sanit. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.* 1974. Vol. 100, no. 1. P. 171–185.

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status. *Freshwater Biol.* 2009. Vol. 54. P. 1312–1323. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02183.x

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Onega Lake and its tributaries. *Water resources.* 2010. Vol. 37, no. 6. P. 842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102

Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A. Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon. *Chem. Geol.* 2010. Vol. 269. P. 12–21. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.08.007

Tekanova E. V., Syarki M. T. Peculiarities of phenology of the primary production process in the pelagic zone of Lake Onega. *Biol. Bull.* 2015. Vol. 42, no. 6. P. 556–562. doi: 10.1134/S1062359015060114

Received December 27, 2018

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Леонов Александр Васильевич**

главный научный сотрудник, д. х. н., проф.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: leonov@ocean.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  
тел.: (8142) 576541

## **CONTRIBUTORS:**

### **Leonov, Alexander**

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: leonov@ocean.ru

### **Zobkova, Mariya**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: rincalika21@yandex.ru  
tel.: (8142) 576541

## ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 551.8:556.55 (1–924.14/.16)

### ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОЗЕРООБРАЗОВАНИЯ НА АНДОМСКОЙ ЛЕДРАЗДЕЛЬНОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

**Т. С. Шелехова, Н. Б. Лаврова**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Представлены результаты комплексных исследований позднеледниковых и голоценовых озерно-болотных отложений на территории Андомской ледораздельной возвышенности, расположенной в зоне сочленения Фенноскандинавского кристаллического щита и Русской плиты. Приведено описание геоморфологического строения района исследований. Согласно полученным данным, формирование озера на месте нынешнего болота началось только в аллереде, то есть значительно позднее освобождения территории от поздневалдайского ледника. Такое запаздывание было обусловлено спецификой ранних стадий дегляциации с образованием массивов и глыб мертвого льда. Таяние стагнированного льда продолжалось вплоть до бореального времени. В изученном праводоеме в позднеледниковье и пребореале накапливались терригенные осадки. Резкая смена их органогенными отложениями зафиксирована около 7700 л. н. Установлено, что отложения бореального времени, вероятно, были полностью размыты вследствие окончательного таяния глыбы мертвого льда, подпруживавшей водоем. Снижение уровня воды в нем привело к зарастанию и дальнейшему заторфовыванию котловины. Развитие растительного покрова существенно запаздывало относительно времени отступления ледника в связи с длительным существованием массивов мертвого льда. Выполнена реконструкция динамики растительности с позднеледниковья до современности. В позднеледниковье территорию исследования занимали тундровые ерnikово-зеленомошные палеосообщества. В пребореале появились березовые редколесья, сменившиеся березовыми редкостойными лесами. В начале атлантического времени на изучаемой территории произрастали березовые, а затем березово-еловые южнотаежные леса. Похолодание климата на границе атлантического и суббореального времени привело к распространению еловых и елово-сосновых среднетаежных лесов. К концу субатлантического периода возросла роль березы.

**Ключевые слова:** спорово-пыльцевой анализ; диатомовый анализ; донные отложения; динамика растительности; палеогеография; позднеледниковье; голоцен; Восточная Фенноскандия.

#### **T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova. PALEOGEOGRAPHIC CONDITIONS OF LAKE FORMATION ON ANDOMA ICE-DIVIDE UPLAND**

The results of an integrated study of Late Glacial and Holocene lake-mire deposits on Andoma Ice-divide Upland, located in the Fennoscandian Crystalline Shield-Russian

Plate contact zone, are reported. The geomorphological structure of the study area is described. The data obtained show that it was not until the Alleröd, i. e. much later than the Late Valdai glacier had retreated from the study area, that a lake began to form in what is now a mire. This delay was due to some distinctive features of the early deglaciation stages at which dead ice blocks and massifs were formed. The stagnated ice continued to melt until Boreal time. Terrigenous sediments accumulated in the proto-lake in Late Glacial and Preboreal time. They were rapidly succeeded by organic deposits about 7700 B. P. Boreal deposits are assumed to have been completely eroded after the dead ice block damming the lake had completely thawed. As the water level of the lake declined, the lake basin began to get overgrown and peat formation continued. The plant cover development lagged much behind the glacial retreat because dead ice massifs persisted for a long time. The vegetation dynamics from Late Glacial time to the present has been reconstructed. In Late Glacial time, the study area was occupied by tundra dwarf arctic birch-true moss paleocommunities. Open birch woodland, succeeded by sparse birch forests, formed in Preboreal time. Birch forests, succeeded by birch-spruce south-taiga forests, grew in the study area in early Atlantic time. As the climate cooled down at the Atlantic-Subboreal time boundary, spruce and spruce-pine mid-taiga forests began to spread. The contribution of birch increased by the end of the Subatlantic Period.

**Key words:** spore-and-pollen analysis; diatom analysis; bottom sediments; vegetation dynamics; paleogeography; Late Glacial time; Holocene; Eastern Fennoscandia.

## **Введение**

Условия озерообразования в юго-восточной Карелии и прилегающей территории представляют особый интерес в связи со спецификой ранних стадий деградации ледника. После отступления ледникового края из районов восточного сектора оледенения значительные массивы мертвого льда теряли связь с областями питания и быстро стагнировались. Карбоновый глинт мог играть значительную роль в деградации рассматриваемой территории в качестве линии отрыва мертвого льда от основной площади покровного ледника. Отчленение периферийной части ледника вдоль карбонового уступа вызвало перемещение его активного фронта в проксимальном направлении и последующие релаксационные надвиги на поля мертвого льда. В результате сложнопостроенный комплекс рельефа протягивается вдоль глинта в северо-восточном направлении через Вепсовскую и Андомскую возвышенности и Колодозерско-Кенозерские гряды. Исследование десятков озер в этих районах указывает на их зарождение только в начале голоцена, после таяния мощных массивов погребенного льда [Демидов, 2005]. Наиболее древние датировки донных отложений малых озер, указывающие на время локального таяния массивов мертвого льда, получены в бассейне озер Тамбичозеро (11 635 ± 225) и Пичозеро (10 500 ± 125) [Wohlfarth et al., 2002, 2004]. Новые палеогеографические реконструкции на основе данных спорово-пыльцевого и диатомового анализов позволили получить дополнительные сведения об особенностях образования озер для территории Андомской возвышенности.

## **Район исследований**

В данной статье обсуждаются результаты первых палеогеографических исследований на Андомской возвышенности, расположенной в зоне сочленения Фенноскандинавского щита и Русской плиты.

Андомская ледораздельная аккумулятивно-цокольная возвышенность сформировалась на стыке Онежско-Белозерской и Воже-Лачской ледниковых лопастей Онежско-Карельского ледникового потока последнего поздневалдайского Скандинавского оледенения. Условия ее формирования и особенности строения были predetermined геологическим строением докембрийских и палеозойских образований юго-восточной окраины Фенноскандинавского кристаллического щита и глобальными изменениями климата в четвертичном периоде. После таяния ледника здесь сформировался холмисто-котловинный рельеф (рис. 1), встречаются и округлые плосковершинные платообразные холмы, морфологически весьма схожие со звонцами, озерно-ледниковые формы рельефа типа камов, но сложенные суглинистыми осадками. Значительным развитием пользуются также кольцевые и купольные диапиры, наиболее хорошо выраженные около оз. Сойдозеро, хотя вполне вероятно, что часть из них может быть отнесена к камовым холмам. В северной части Андомской возвышенности широко развита мелкохолмистая и холмисто-моренная равнина, приуроченная к склону карбонового уступа. В составе валунно-галечных фракций в морене преобладают кристаллические породы Фенноскандинавского щита – раз-

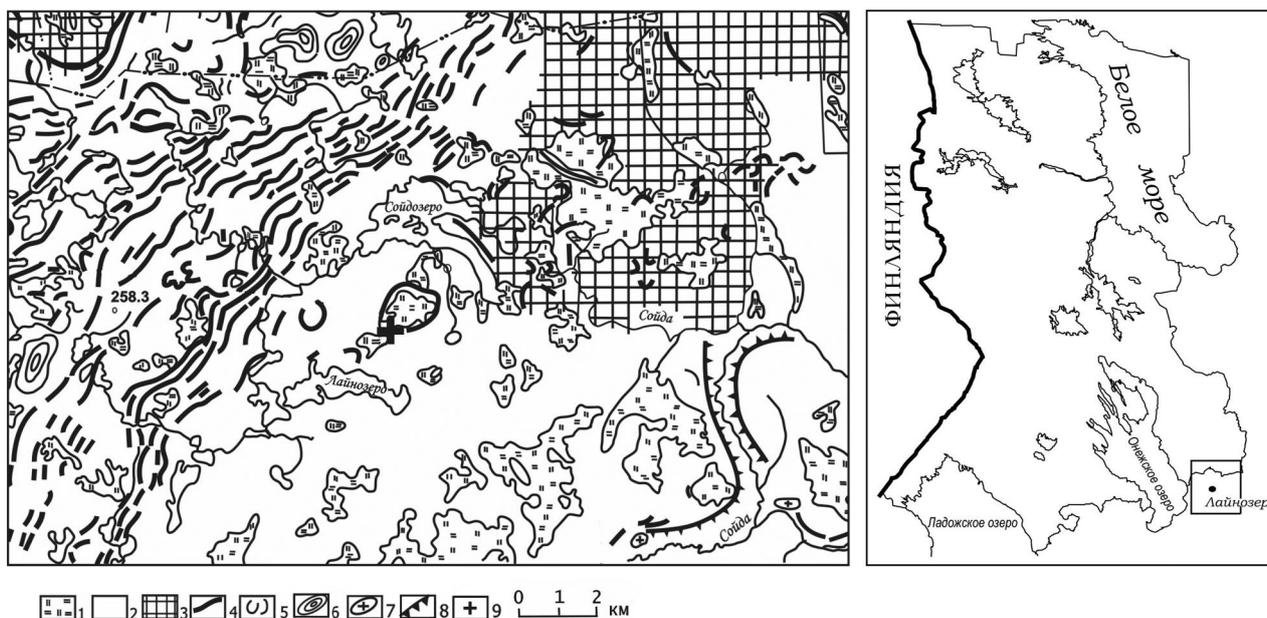


Рис. 1. Геоморфологическое строение района исследований и местоположение скважины (схема составлена с использованием материалов И. Н. Демидова, В. А. Ильина):

1 – болота, 2 – моренная равнина, 3 – холмисто-западинный моренный рельеф, 4 – конечно-моренные гряды напорных образований, 5 – кольцевые и полукольцевые гряды, купольные диапиры, 6 – звонцы, 7 – выходы коренных пород, 8 – ложбины стока талых ледниковых вод (эрозионные врезы в дочетвертичных породах), 9 – точка отбора проб

Fig. 1. Geomorphological structure of the study area and the borehole location (the scheme was compiled using the materials of I. N. Demidov and V. A. Ilin):

1 – mires, 2 – morainic plain, 3 – knob-and-kettle moraine relief, 4 – dead-ice ridges of pressure formations, 5 – circular and semi-circular ridges, domed diapirs, 6 – kame upland, 7 – rock outcrops, 8 – outwash dells (erosion potholes in the Pre-Quaternary rocks), 9 – sampling point

личные гранитоиды, а также вулканогенные и осадочные породы северного берега Онежского озера. Характерными для Андомской возвышенности формами рельефа являются также древние эрозионные врезы в дочетвертичных породах, хорошо выраженные в современном рельефе в виде долин рек Сойда, Самина, Андома, Куржекса, ручьев Гантаручей, Белый и др. При деградации оледенения они являлись ложбинами стока талых ледниковых вод. Глубина долин – 40–50 м, а мощность заполняющих их флювиогляциальных песчано-галечно-валунных отложений, местами перекрытых аллювиальными и озерно-болотными осадками, может достигать 50–70 и более метров. В долинах часто прослеживаются одна-две аккумулятивные террасы, высотой до 2–4 м, свидетельствующие о более высоких уровнях потоков. Поверхность террас иногда осложнена воронками диаметром от нескольких метров до десятков метров, вероятно гляциокарстового происхождения. Днища долин часто лишены песчано-гравийно-галечного материала и заполнены валунными полями типа курумов [Бархатова, 1941; Рихтер, 1960; Рихтер, Чикишев, 1966; Демидов, 2000]. КERN озерно-болотных отло-

жений был получен из скважины, пробуренной на окраине болота с изометричными очертаниями в виде восьмерки, окаймленного полукольцевой грядой (рис. 1).

Район исследований относится к атлантико-континентальной области умеренного климатического пояса. Преобладающий тип растительности – леса среднетаежные еловые, широко развиты болота осоково-сфагнового типа.

### Материалы и методы

Материалом для исследований послужил керн озерно-болотных отложений мощностью 6,5 м. Скважиной, пробуренной на болоте в 700 м к северу от озера Лайнозеро (61°20'50" с. ш. 37°24'40" в. д., на абс. отм. 220 м), вскрыты следующие осадки (глубина в метрах):

0,00–0,80 – сильнообводненный торф.

0,80–1,65 – торф темно-коричневого цвета с большим количеством растительных остатков.

1,65–2,08 – торф черного цвета с куском древесины на гл. 1,92 м.

2,08–2,14 – слой сапропеля с растительными остатками.

2,14–2,24 – алевриты серо-коричневого цвета, обогащенные органикой, с многочисленными остатками растений.

2,24–2,57 – алевриты светло-серого цвета с желтым оттенком и черными полосчатыми вкраплениями разложившихся органических остатков.

2,57–3,41 – гомогенные алевриты серого цвета.

3,41–3,60 – алевриты серого цвета с ярко выраженной полосчатостью в виде черных тонких прослоек органики.

3,60–3,85 – алевриты желтого цвета, пятнистые, разделенные на гл. 3,72–3,73 м прослойком черного цвета тонкозернистого песка с органикой.

3,85–3,88 – прослоек алевритов темно-желтого цвета.

3,88–4,00 – алеврит серого цвета с желтыми пятнами.

4,00–5,90 – алеврит серого цвета с заметной линейной слоистостью в виде черных тонких прослоек органики. На гл. 4,81–4,82 м выделяется тонкий прослоек песка желтого цвета.

5,90–6,23 – тонкие, почти одноцветные алевриты серо-голубоватого цвета.

6,23–6,50 – грубые ритмично-слоистые алевриты, переслаивающиеся с разнозернистыми песками. На верхнем контакте (гл. 6,23 м) прослоек грубозернистого песка.

6,50–6,90 – чередование серых глинистых слоев со светло-серыми песчанистыми с темными тонкими прожилками (вероятно, органики или тяжелых минералов).

6,90–7,00 – мелкозернистые глинистые пески.

При исследовании керн осадков использовались следующие методы: литологический, спорово-пыльцевой, диатомовый, химический, радиоуглеродный ( $C^{14}$ ). После стратиграфического разделения осадков было отобрано 13 образцов на химический анализ (гл. 1,95–6,45 м). Полный силикатный анализ был выполнен по 12 элементам (окислам):  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $H_2O$ , п.п.п. (процент при прокаливании) методами сплавления, калориметрирования, кислотного разложения, весовым методом. С глубины 2,08–2,10 м (контакт сапропеля и торфа) получена радиоуглеродная датировка **7710 ± 60 (SU 3335)** с использованием валового органического материала и куска древесины (возраст некалиброванный). Нижняя часть колонки (гл. 7,0–6,5 м) была взята на исследование варвохронологическим методом, и ее не удалось изучить методами спорово-пыльцевого и диатомового анализов.

Техническая обработка проб на диатомовый анализ выполнена по общепринятым методикам [Диатомовые..., 1974; Давыдова, 1985], включающим выделение створок из донных осадков и приготовление постоянных препаратов. Для этого образцы дезинтегрировались и очищались от загрязнений с помощью пиррофосфорнокислого натрия с последующей отмывкой от него методом декантации. Подъем диатомей осуществлялся с помощью калиево-кадмиевой тяжелой жидкости. В качестве среды для заключения створок диатомей применяли анилин-формальдегидную смолу (показатель преломления 1,68). Створки диатомей подсчитывали по горизонтальному ряду в средней части стекла до 250 экземпляров. Идентификация диатомей по возможности производилась до вида, разновидности и формы с использованием различных источников [Mölder, Tynni, 1967–1973; Tynni, 1975–1980; Krammer, Lange-Bertalot, 1986; Генкал и др., 2015; Куликовский и др., 2016 и др.]. Экологические характеристики видов получены по: [Баринава и др., 2006], сделан подсчет соотношения видов по географическому распространению, галобности, отношению к pH. Выполнены реконструкции pH-среды [по: Renberg, Hellberg, 1982].

Обработка проб для спорово-пыльцевого анализа осуществлялась по общепринятым методикам [Пыльцевой..., 1950]. При идентификации пыльцевых зерен привлекали справочники-определители [Куприянова, Алешина, 1972, 1978; Бобров и др., 1983; Moore et al., 1991 и др.], а также эталонную коллекцию пыльцы и спор ИГ КарНЦ РАН. Спорово-пыльцевая диаграмма построена с использованием компьютерных программ TILIA-2 и TILIA GRAPH [Grimm, 1992]. Подсчет процентных соотношений проводился следующим образом: за 100 % принята сумма пыльцы древесных и кустарниковых и травянистых и кустарничковых растений, доля пыльцевых таксонов рассчитывалась от этой суммы. Содержание спор – от суммы пыльцы и спор, содержание дочетвертичных спороморф – от суммы пыльцы и дочетвертичных микрофоссилий. Примененный метод расчета позволил избежать искажения диаграмм из-за высокого содержания в озерно-болотных отложениях спор Bryales. Параллельно с палинологическим исследованием в образцах проведено видовое определение водорослей *Pediastrum* [по: Komarek, Jankovska, 2001]. Проанализировано 77 образцов, определено 85 таксонов пыльцы растений. Результаты анализа представлены на спорово-пыльцевой диаграмме (рис. 2).



## Результаты исследований

### Спорово-пыльцевой анализ

Диаграмма достаточно четко подразделяется на три части: нижнюю, характеризующуюся высоким и стабильным содержанием пыльцы травянистых пород, среднюю – выделяющуюся увеличением вклада пыльцы древесных, и верхнюю, содержащую минимальное количество пыльцы травянистых. Особенностью диаграммы является резкое изменение в СПС на глубине 2,10 м. Еще одна характерная черта диаграммы – два продолжительных пика спор Bryales. В основу периодизации диаграммы легли биостратиграфические схемы позднеледникового и голоцена [Хотинский, 1977; Елина, 1981]. В целях повышения достоверности при палинологическом обосновании стратиграфического расчленения толщи донных осадков наши данные сопоставлены с результатами изучения относительно близко расположенных разрезов Восточной Карелии [Демидов, Лаврова, 2001; Сапелко, 2002], Южной Карелии [Сапелко и др., 2016], юго-запада Архангельской области [Хомутова, 1978; Сапелко, 2006], севера Вологодской области [Косорукова и др., 2017], а также разрезов позднеледниковых отложений Юго-Восточной и Южной Карелии [Wohlfarth et al., 2002; Лаврова, 2005а, б]. На основании изменения состава и соотношений компонентов спорово-пыльцевых спектров (СПС) выделено шесть палинологических зон (ПЗ), соответствующих климатическим периодам и фазам голоцена.

**ПЗ I (6,50–3,90 м).** Насыщенность осадков пыльцой невелика. Зафиксированы дочетвертичные спороморфы, некоторые пыльцевые зерна четвертичного возраста (*Tilia*, *Quercus*, *Pinus*, *Picea*) смяты, повреждены, облик их характеризуется своеобразным «стеклянным блеском», темной плотной экзиной. Для СПС зоны характерно преобладание пыльцы древесных, среди которых на первом месте выступает пыльца *Pinus*, причем кривая уменьшается по направлению к верхней границе зоны. Такую же тенденцию обнаруживает и пыльца *Alnus*. Доля пыльцы *Betula* sect. *Albae*, напротив, возрастает. Присутствует пыльца термофильных пород – *Quercus*, *Tilia*, *Carpinus*, *Corylus*. Весьма высок вклад пыльцы кустарничков *Betula nana* и травянистых *Artemisia* и *Chenopodiaceae* (среди которых *Eurotia ceratoides*, *Ch. rubrum*, *Ch. album*, *Ch. polyspermum* и др.). Примечательна непрерывная кривая пыльцы *Alnaster fruticosus* и *Ericales*, спорадически встречается *Ephedra*, *Juniperus*. В разнотравье преобладает пыльца семейства *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Bras-*

*sicaceae* и др. Идентифицирована пыльца *Helianthemum*, *Dryas octopetala*, *Thalictrum alpinum* и др. Среди водных и прибрежно-водных видов присутствуют единичные пыльцевые зерна *Typha*, *Alisma*, *Myriophyllum*. Главное место в группе споровых принадлежит Bryales, содержание которых достигает 50 %. Количество спор *Polytrichaceae* невелико. Плауны представлены как бореальными, так и арктоальпийскими видами (*Lycopodium pungens*, *Diphasiastrum complanatum*, *D. alpinum*), зафиксированы споры *Selaginella selaginoides*. Пыльца макрофитов встречается спорадически. Постоянно присутствуют *Pediastrum*: *P. boryanum* var. *boryanum*, *P. integrum* var. *integrum*, *P. kawraiskii*. Состав СПС, анализ экологических групп компонентов спектров, присутствие переотложенных дочетвертичных спороморф позволяет предположить, что палинозона была сформирована в аллереде и позднем дриасе. Подобные СПС выделены в слое ленточноподобных алевритов оз. Тамбичозеро [Wohlfarth et al., 2002], расположенного к юго-востоку, которые накапливались в аллереде и позднем дриасе, а также в других позднеледниковых отложениях Карелии [Лаврова, 2005б]. В нашем случае спектры позднеледниковых отложений имеют несколько сглаженный характер, но вполне вероятно, условная граница между отложениями аллереда и позднего дриаса соответствует уменьшению количества пыльцы *Betula nana* и возрастанию – *Artemisia* на глубине 510 см. Увеличение вклада пыльцы *Artemisia* может быть связано с появлением новых нарушенных местообитаний, возникших при активизации процессов эрозии в позднем дриасе. Верхняя граница палинозоны соответствует увеличению вклада пыльцы древесных.

**ПЗ II (3,90–2,14 м).** Значительно увеличивается насыщенность осадков пыльцой. Состав СПС этой зоны сходен с таковым ПЗ I, при этом характеризуется заметным повышением доли пыльцы *Betula* sect. *Albae* (*Betula pubescens*, *B. czerepanovii*). Вклад пыльцы *Artemisia* и *Chenopodiaceae* уменьшается. Количество *Betula nana* достигает максимальных значений у верхней границы зоны, что, возможно, связано с похолоданием, называемым переяславским [Хотинский, 1977]. Следует отметить следующие особенности СПС – возрастание количества пыльцы *Salix*, *Cyperaceae*, *Poaceae*. Уменьшение количества пыльцы термофильных пород и дочетвертичных спороморф указывает на затухание процессов переотложения. Перигляциальные элементы флоры практически исчезают из состава спектров к верхней границе палинозоны. Возрастает разнообразие и количество пыльцы водных и прибрежно-водных видов –

*Myriophyllum*, *Typha*, *Sparganium*. В этой зоне отмечено увеличение вклада Polypodiaceae и второй продолжительный максимум спор Bryales. Состав СПС палинозоны и совокупность других признаков свидетельствуют об изменении климата в сторону потепления и повышения влажности. Подобные изменения в СПС свойственны отложениям пребореала Северо-Запада России [Хотинский, 1977], Фенноскандии, Онежско-Ладожского перешейка [Лаврова, 2005а, б; Сапелко и др., 2016], Карельского перешейка [Субетто и др., 2003], Архангельской области [Девятова, 1969], Республики Коми [Голубева, 2008, 2010] и др. Учитывая все совокупности признаков, особенно увеличение вклада в СПС пыльцы древесных пород, можно предположить, что СПС палинозоны были сформированы в пребореальное время.

**ПЗ III (2,10–2,14 м).** Контакт между слоем сапропеля и нижележащими отложениями резкий, четкий. Столь же отчетливые изменения наблюдаются в спектрах: вклад пыльцы *Betula nana* падает от 40 до 14 %, *Betula sect. Albae* – от 30 до 18 %. Значительно возрастает количество пыльцы термофильных пород, особенно *Ulmus*, что свидетельствует об изменении климата в сторону потепления. Отмечено значительное возрастание *Picea* (~ 20 %), пик пыльцы *Pinus* (~ 30 %), небольшие пики Cyperaceae, Rosaceae и спор Polypodiaceae. Резко изменившийся характер спорово-пыльцевых спектров наряду со столь же резким, без плавного перехода, изменением генетического типа отложений может указывать на перерыв в осадконакоплении. Полученная радиоуглеродная дата  $7700 \pm 60$  (SU-3335) (гл. 2,08–2,10 м) свидетельствует о том, что СПС палинозоны были сформированы в начале атлантического периода.

**ПЗ IV (2,03–1,02 м).** СПС этой зоны выделены в слое торфа. Объединяющим фактором является самое высокое содержание пыльцы термофильных пород за всю историю накопления осадков. Кривая пыльцы *Picea* проявляет тенденцию к росту, зеркально отражая падение кривой *Betula sect. Albae*. Вклад *Pinus* постепенно увеличивается к верхней границе палинозоны. Обращает на себя внимание достаточно высокое содержание пыльцы *Betula nana*. Занимая зачастую ведущую роль в растительном покрове в позднеледниковье – начале голоцена в более теплые периоды *Betula nana* находит благоприятные местообитания на болотах. Количество спор Lycopodiaceae ничтожно. Анализ СПС позволяет считать, что климат был теплее и влажнее, чем во время формирования предыдущей палинозоны, и соотнести ее с атлантическим временем. Наибольшее сходство

СПС данной зоны обнаруживают со спектрами отложений атлантикума Северо-Запада европейской части России [Хотинский, 1977], развившееся в увеличении количества пыльцы термофильных пород, достигшего максимального значения. Помимо этого, общим признаком для СПС атлантического периода является увеличение вклада пыльцы ели, отмечаемое во многих диаграммах Южной и Восточной Карелии [Елина и др., 2000], на левобережье реки Свири, в среднем ее течении [Сапелко, 2016], в Вологодской области в бассейне оз. Воже, в Архангельской области, в Кенозерском парке [Сапелко, 2006]. Отметим, что в диаграммах Северо-Востока европейской части России количество пыльцы ели значительно возрастает уже в бореале [Никифорова, 1982; Марченко, Дурягина, 1996 и др.], поскольку распространение ее шло с востока на запад, северо-запад и юго-запад [Савельева, 2007].

**ПЗ V (1,02–0,60 м).** Основанием для выделения этой палинозоны послужило выпадение из СПС пыльцы *Quercus* и сокращение доли пыльцы других термофильных пород (*Tilia*, *Ulmus*, *Corylus*, *Alnus glutinosa*), что указывает на уменьшение влаго- и теплообеспеченности, свойственное началу суббореального времени. Такие изменения наблюдаются практически во всех подтвержденных радиоуглеродными датировками диаграммах [Филимонова, 2014 и др.]. Количество пыльцы *Picea* достигает максимальных значений (до 45 %). Наряду с пыльцой ели доминирующим компонентом спектров выступает пыльца *Picea* и *Pinus*, содоминантом – пыльца *Betula sect. Albae*. Следует отметить, что кривые указанных таксонов нестабильны, обращает на себя внимание пик пыльцы *Betula sect. Albae*. В этой зоне значительно уменьшается количество пыльцы *Betula nana*, увеличивается вклад Rosaceae и Cyperaceae, спор Sphagnales и *Equisetum*. Анализ СПС позволяет предположить, что рассматриваемые СПС были сформированы в суббореальное время.

**ПЗ VI (0,60–0,00 м).** В этой палинозоне заметно возрастает количество пыльцы травянистых пород, как за счет Cyperaceae и Rosaceae, так и за счет пыльцы группы разнотравья. Господствует пыльца *Picea*, *Pinus*, *Betula sect. Albae*, при этом вклад пыльцы ели уменьшается, а березы – увеличивается. Пыльцы термофильных пород становится меньше, и к верхней границе зоны она исчезает.

#### Диатомовый анализ

Диатомовый анализ озерно-болотных отложений позволил выявить четыре этапа раз-

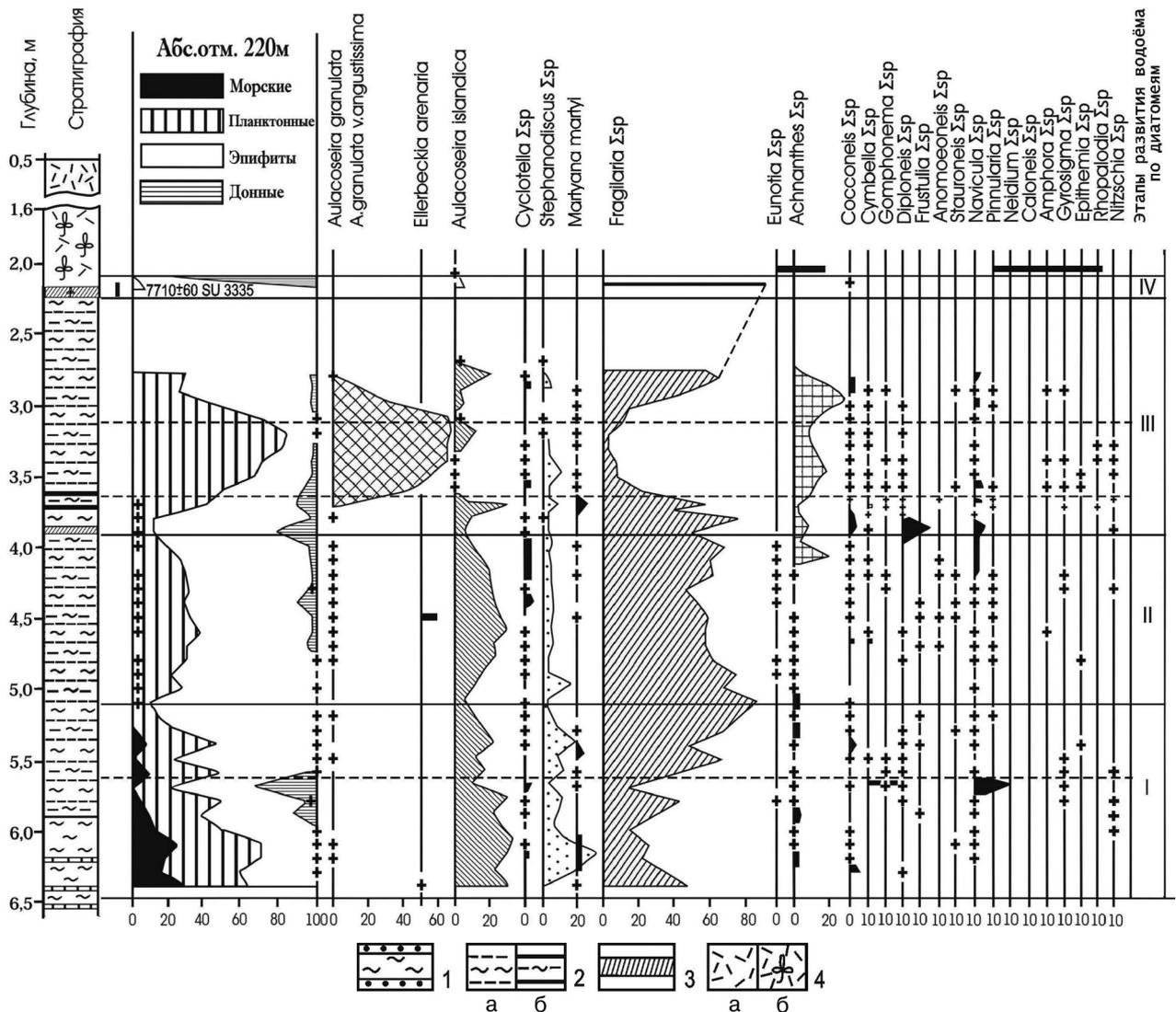


Рис. 3. Диатомовая диаграмма скважины «Лайнозеро»:

1 – алевриты, переслаивающиеся с песком; 2а – сезонно-слоистые алевриты; 2б – сезонно-слоистые алевриты с тонкими глинистыми прослойками; 3 – слой органики (сапропель); 4а – торф; 4б – торф с растительными остатками

Fig. 3. Diatom diagram of the Lainozero borehole:

1 – aleurites, interbedded with sand; 2a – seasonally layered aleurites; 2b – seasonally layered aleurites with thin clay layers; 3 – organic layer (sapropel); 4a – peat; 4b – peat with plant residue

вития диатомовой флоры, некоторые из них разделены на фазы – диатомовые зоны (DZ). По результатам анализа построена диатомовая диаграмма (рис. 3), на рис. 4. приводятся эколого-географическая характеристика диатомовой флоры и pH-спектр.

**I этап (гл. 6,5–5,1 м)** – происходило накопление сезонно-слоистых алевритов с прослойками разномерных песков, вверх по разрезу переходящих в серые алевриты с тонкими полосками органики черного цвета. Текстура отложений, по-видимому, отражает интенсивность таяния массивов мертвого льда, в результате чего образовались кольцевые гряды (рис. 1).

По диатомовой флоре на этом этапе четко выделяется две диатомовые зоны (DZ) – DZ-1 и DZ-2.

**DZ-1 (гл. 6,5–5,6 м)** – диатомовый комплекс отличается значительным участием морских диатомей: *Coscinodiscus* sp., *Coscinodiscus subsalsus* Juhlin-Dannfelt, *Thalassiosira baltica* (Grunow) Ostefeld, *Podosira stelligera* (Bailey) A. Mann, *Diploneis interrupta* (Kützing) Cleve, *Cocconeis scutellum* Ehren., силикофлагелляты *Dityocha speculum* Ehrenberg и др., содержание которых достигает 16–32 % (рис. 3 и 4). Наряду с этими формами в осадках преобладает пресноводная флора, в которой доминируют

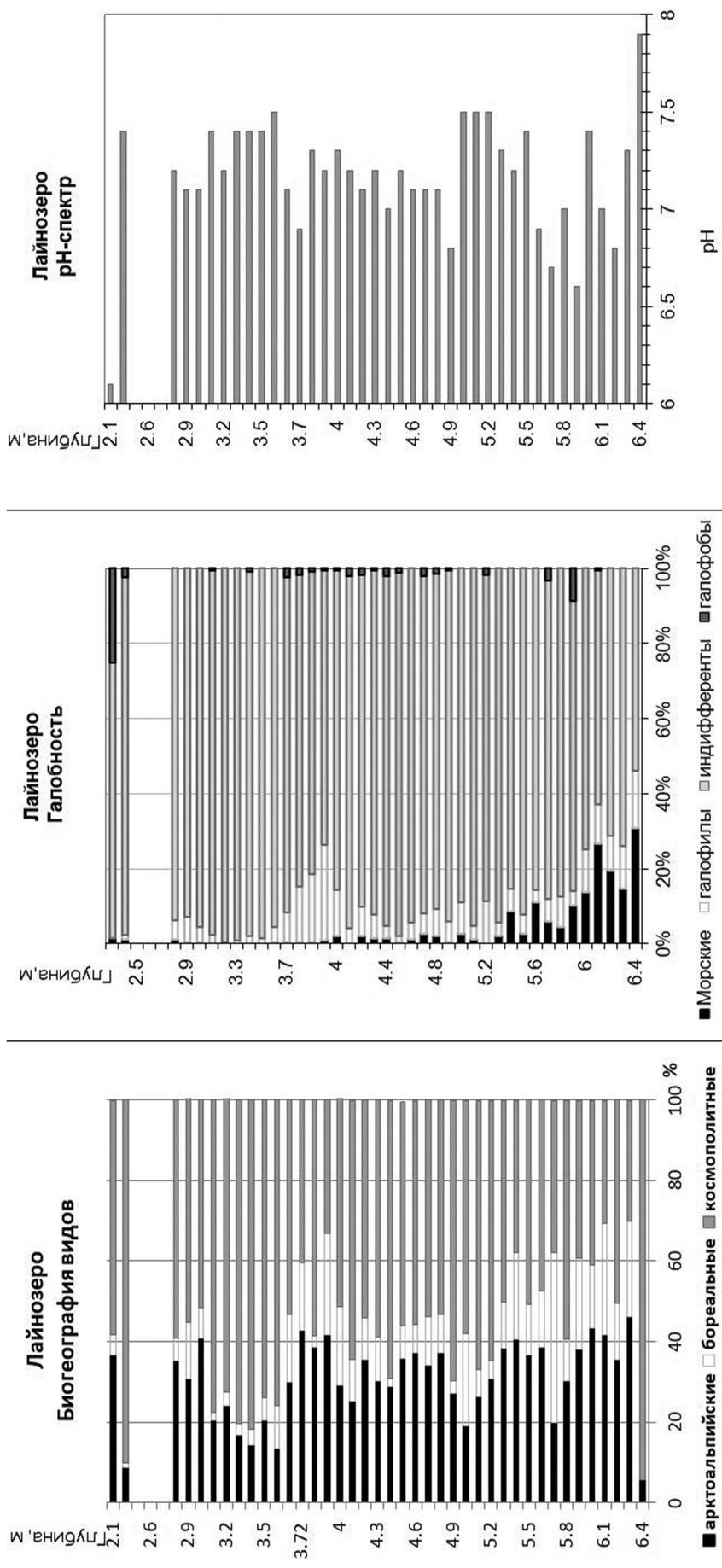


Рис. 4. Эколого-географические характеристики и pH спектр озерно-болотных отложений скважины «Лайнозеро»  
 Fig. 4. Ecological and geographical characteristics and pH spectrum of lake-mire deposits of the Lainozero borehole

планктонные *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* O. Mull., *Stephanodiscus niagare* Ehr., *S. astraea* (Ehr.) Grun. + var. *intermedius* Fricke и литоральные рода *Fragilaria* sensu lato: *F. brevistriata* Grun., *F. construens* (Ehr.) Grun., *F. pinnata* Ehrenberg. Можно предположить, что в это время происходил активный процесс размыва отложений, содержащих ископаемые морские диатомеи. В пресноводном комплексе преобладают алкалифилы (рис. 4), что говорит о щелочной среде (pH 7,9–7,3), а также индифференты по отношению к солености. Присутствие галофилов незначительно (от 7 до 12 %). По отношению к географическому распространению доминирующая роль принадлежит космополитам. Однако необходимо отметить, что продуктивность флоры в это время была невысокой. В осадках этой фазы обнаружено 23 вида пресноводных диатомей. Низкое их содержание связано с высоким терригенным разбавлением алевритов, а также невозможностью активной вегетации водорослей вследствие большой мутности воды и ее низких температур в водоеме с постоянным притоком талых ледниковых вод. Необходимо отметить, что в данных отложениях повсеместно присутствует в достаточно большом количестве *Pediastrum kawraiski* Schmidle – представитель позднеледниковых водоемов.

**DZ-2 (гл. 5,6–5,1 м)** выделяется по резкому снижению в диатомовом комплексе численности планктонных диатомей (с 40 до 10 %), которые вытесняются эпифитами (28–45 %), главным образом *Fragilaria brevistriata* Grun., *F. inflata* (Heid.) Hust., и донными, достигающими максимального содержания (33 %). Увеличивается видовое разнообразие и численность в группе обростателей *Cymbella* Ag. и донных *Navicula* Bory, среди которых отмечены *N. radiosa* Kutz. и мезогалобы *N. peregrina* (Ehr.) Kutz., *N. reinhardtii* (Grun.) Cl. Очень показательны появление донных видов рода *Nitzschia*: *N. denticula* (Grun.), *N. acidoclinata* Lange-Bertalot, *N. fonticola* Grunov, *N. angustata* (W. Sm.) Grun. и рода *Diploneis* sp., *D. finnica* (Ehr.) Cl., *D. domblittensis* (Grun.) Cl., *D. marginestriata* Hust. В структуре видов по географическому распространению заметно (с 10–20 до 40 %) расширился спектр бореальных, за счет как арктоальпийских, так и космополитов. Условия среды изменялись от слабощелочных до близких к нейтральным или слабощелочным (pH 6,6–7,0–7,4). Во время данной фазы развития водоема еще присутствуют морские диатомеи, но их содержание сократилось с 25 до 2 % и единичных экземпляров. Таким образом, для всего этапа характерно значительное участие переотложенных морских диатомей, щелочные условия среды, что

может свидетельствовать о расконсервации мертвых льдов, а затем затухании процессов размыва и переотложения осадков, снижении поверхностного стока в конце этапа.

**II этап, DZ-3 (гл. 5,1–3,9 м)** – продолжалось накопление глинистых алевритов с заметной линейной слоистостью в виде тонких прослоек органики. В составе диатомового комплекса доминировали эпифиты рода *Fragilaria* (Lyngb.) (68–47 %), увеличилось их разнообразие за счет видов родов *Achnanthes* Bory, *Cocconeis* Ehr., *Cymbella* Ag. Вместе с тем в качестве доминантов выступали планктонные *Aulacoseira islandica* O. Mull., *Stephanodiscus* spp. Ehr., *Cyclotella* spp. Kutz. (10–37 %). Возросло участие донных видов *Navicula* Bory, *Pinnularia* Ehr., *Frustulia* Ag., *Amphora* Ehr. до 2–10 %. Следует отметить присутствие вида *Ellerbeckia arenaria* (Moore) Krouford, характерного для приледниковых водоемов с притоком талых холодных вод. Кроме этого, единичное участие в составе комплекса створок морских диатомей *Hyalodiscus subtilis* Bail., *Coscinodiscus* sp. Ehr., *Thalassiosira* sp. Cl. может указывать на продолжающиеся процессы переотложения, хотя и менее интенсивные. В составе диатомового комплекса господствовали алкалифилы, составляя 80 % (pH 7,2–7,5), заметно возросла роль галофилов с 4 до 25 %. По сравнению с предыдущей фазой расширился спектр арктоальпийских – с 35 до 40 % и бореальных – с 10 до 28 %. Выявлен более разнообразный спектр *Pediastrum*: *P. orientale* (Skuja) Jankovska et Komarek, *P. integrum* var. *integrum* Nag., *P. simplex* Meyen, *P. boryanum* var. *boryanum* Menegh. На основании этих данных можно предположить, что климат стал более сухим, характерным для позднего дриаса. (В более сухом климате повышалось содержание галофилов. Известно, что соленость вод в ледниковые этапы росла, в межледниковые – падала.)

**III этап (гл. 3,90–2,3 м).** По диатомовым комплексам выделяются три фазы, соответствующие DZ-4, DZ-5, DZ-6.

**DZ-4 (гл. 3,90–3,61 м)** – осадки представлены пятнисто-желтыми алевритами с прослойками темно-желтой и черной органики. В диатомовом комплексе доминировали виды рода *Fragilaria*. Их количество возросло с 50–60 до 76 %. Затем с гл. 3,80–3,61 м, где на контакте 3,60–3,61 м прослеживается тонкий прослой органики, участие планктонных *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* и *Stephanodiscus* sp. увеличивается, а доля эпифитов *Fragilaria* снижается с 76 до 60 %. К концу DZ-4 возрастает видовое разнообразие донно-литоральной флоры родов *Cymbella* Ag., *Gomphonema* Ag., *Epithemia* Breb.,

*Rhopalodia* O. Mull., *Diploneis* Ehr., *Navicula* Bory, *Pinnularia* Ehr., *Amphora* Ehr. Такие изменения в ее составе могут указывать на пульсирующий характер формирования осадков. Кроме этого, структуру диатомового комплекса дополнили единичные галофобы *Frustulia* Ag., содержание галофилов, арктоальпийских и бореальных видов не изменилось, pH среды оставался щелочной (6,9–7,5). Морские формы присутствуют единично. Все это свидетельствует о затухании процессов эрозии и переотложения, а следовательно, происходит закрепление грунтов, т. е. создаются условия для развития почв, и это могло быть результатом потепления климата, характерного для начала пребореала.

**DZ-5 (гл. 3,61–3,1 м)** выделена в слое сероцветного алеврита с ярко выраженной полосчатостью в виде тонких черных прослоек органики. В составе диатомового комплекса постепенно нарастает участие планктонных диатомей, в середине фазы достигая 84 %. Основной доминант – *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Ralfs. и его вариации, форма, характерная для эвтрофных водоемов. *Aulacoseira islandica* O. Mull., *Cyclotella* Kütz. и *Stephanodiscus* Ehr. участвуют единично. Обрастатели *Fragilaria* (Lyngb.) составляют 15 % в середине этапа и 29 % в конце его. Заметно присутствие в это время (до 10 %) видов рода *Achnanthes* Bory, которые указывают на рост трофности водоема.

**DZ-6 (гл. 3,1–2,3 м)** – накапливались массивные алевриты серого цвета, постепенно переходящие в светло-серые с желтыми пятнами и черными полосчатыми вкраплениями органических остатков. Продуктивность диатомей в это время резко снизилась. Доля планктонных упала с 80 до 26 %, причем доминантом вновь стал холодолюбивый *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica*. Возросло участие литоральных обростателей *Fragilaria brevistriata* Grun., *F. construens* (Ehr.) Grun., *F. construens* var. *binodis*. Господство алкалифилов свидетельствует о слабощелочной среде (pH 7,5–7,2), индифферентов – о незначительном снижении минерализации воды. Таким образом, осадки, соответствующие DZ-4–DZ-6, предположительно, формировались в течение пребореального периода, за который поднятие уровня водоема сменилось его падением. Это подтверждается составом диатомовой флоры в слое сапропеля с многочисленными остатками растений на глубине 2,1 м, где до 90 % составляют виды рода *Fragilaria* с доминантом *Fragilaria construens*, обитающим на небольших глубинах. В это время фиксируется перерыв в осадконакоплении, т. к. в следующем образце на гл. 2,10–2,08 м уже полностью господствовали типично бо-

лотные виды родов *Pinnularia* Ehr. (65 %) и *Eunotia* Ehr. (25 %), указывающие на начало торфонакопления. Вероятно, из переполненной гляциокарстовой воронки произошел спуск накопившейся воды, в результате чего были размывы ранее отложенные осадки бореала. Полученная радиоуглеродная датировка  $7700 \pm 60$  (SU-3335) (гл. 2,08–2,10 м) и данные спорово-пыльцевого анализа подтверждают накопление слоя органики в атлантическое время.

Выше по разрезу в торфах диатомовая флора отсутствует, что говорит о дальнейшем развитии территории в субаэральных условиях (спуск вод, зарастание).

#### Химический анализ

Данные, полученные с помощью микропалеонтологических методов, довольно хорошо согласуются с результатами химического анализа отложений (рис. 5). По изменениям химического состава элементов в разрезе четко выделяются четыре этапа, соответствующие палеоклиматическим периодам и их фазам (см. рис. 3).

Довольно выразительно постоянное снижение в осадках окислов кальция и натрия, свидетельствующее о постепенном выщелачивании отложений. Синхронно с климатическими изменениями в теплые периоды (I – аллеред, III – пребореал, рис. 5) увеличивается содержание окислов алюминия, магния и калия, и, напротив, их количество снижается в более холодные и сухие периоды (II – поздний дриас). Концентрация окислов титана возрастает пропорционально с потеплением и достигает максимальных значений на рубеже пребореала-бореала, вероятно, с окончательным таянием мертвых льдов. Похожая тенденция наблюдается и для окислов железа: в процессе таяния льдов их содержание повышается, а при завершении – резко падает. Доля окислов марганца при общей тенденции к снижению меняется в зависимости от пульсирующего характера поступающей талой воды.

На графике содержания органического вещества (п.п.п.) в озерно-болотных отложениях (рис. 6) выделяются три этапа: 1-й – гл. 5,6–3,0 м; 2-й – 3,0–2,2 м; 3-й – 2,2–1,95 м и выше. Заметные изменения отражены в интервале глубин 3,0–2,2 м, соответствующих второй половине пребореального периода, а особенно резкое повышение органики в осадках (гл. 2,2–1,95) характерно для атлантического времени, что подтверждается результатами всех анализов. Таким образом, химический анализ является хорошим дополнением и согласуется со всеми проведенными исследованиями.

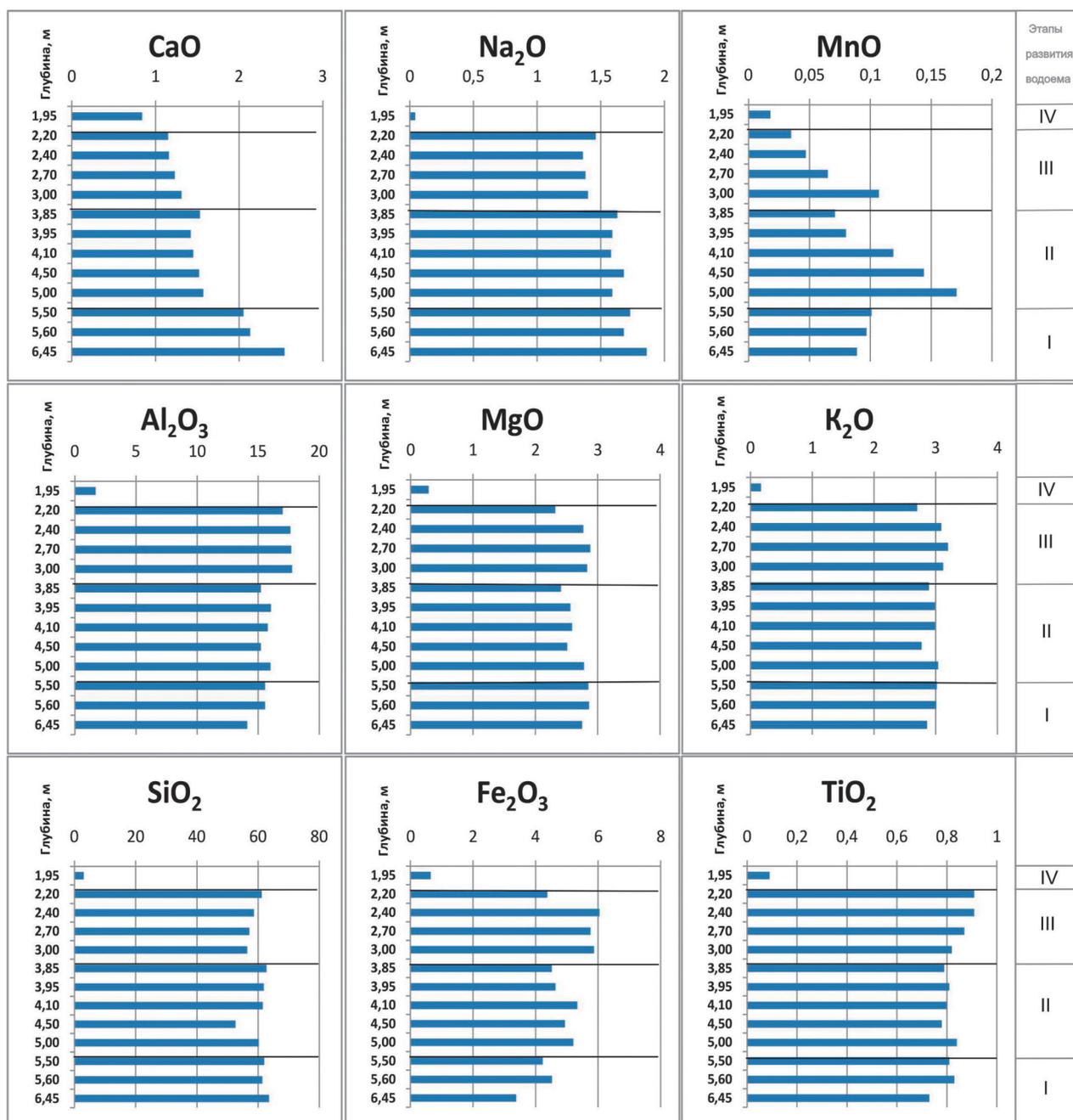


Рис. 5. Химический состав (%) озерно-болотных отложений скважины «Лайнозеро»

Fig. 5. Chemical composition (%) of lake-mire deposits of the Lainozero borehole

### Обсуждение результатов

**Позднеледниковый этап.** Согласно полученным данным (ПЗ I – 6,50–3,90 м) и палеоэкологическому анализу, в СПС присутствует пыльца, продуцируемая экологически несовместимыми растениями, такими, например, как *Tilia cordata* и *Dryas octopetala*. Экологические требования термофильных пород не позволяют им приспособиться к условиям, существовавшим в зоне развития полей мертвого льда, следовательно,

их пыльцу надлежит отнести к переотложенным. Об интенсивных процессах переотложения свидетельствуют и зафиксированные дочетвертичные спороморфы. Возможно, переотложена часть пыльцы древесных пород бореальных лесов, а часть ее занесена ветром из более благоприятных южных и юго-восточных районов. Тем не менее вполне вероятно, что некоторые древесные породы, обладающие высокой экологической пластичностью, находили подходящие местообитания на территории исследования.



Рис. 6. Содержание органического вещества (п.п.п.) в озерно-болотных отложениях скважины «Лайнозеро»

Fig. 6. Organic matter content (loss on ignition) in the lake-mire deposits of the Lainozero borehole

Особенности растительности позднеледниковья определялись множеством факторов. Важнейшая роль принадлежала климатическим факторам, как глобальным, так и локальным, возникающим благодаря соседству с краем ледника с крупными массивами мертвого льда или с огромным холодным приледниковым водоемом. Отметим также, что уровень водоемов довольно динамично менялся при общей тенденции к понижению. В результате быстро осушались обширные участки мелководий, как песчаных, так и валунных и каменистых. Особые условия создавало переувлажнение грунтов тальными водами, поступающими с тающего ледника наряду с сухими климатическими условиями, свойственными заключительным этапам оледенений. Также на становление растительности оказывает влияние состав и мощность осадков, но одно из важнейших условий – особенности рельефа, обеспечивающие различные варианты воздействия солнечной радиации, ветра, снежного покрова и влажности. Отметим, что в условиях безлесной местности главным образом микрорельеф контролирует распределение растительных сообществ. При несомкнутом растительном покрове в развитии и распространении палеосообществ большое значение имело отсутствие конкуренции. В то же время нельзя не учитывать, что в подобной обстановке некоторые растения могли иметь более широкие экологические амплитуды, чем в настоящее время. Итак, разнообразие природных условий создавало ши-

рокий спектр местообитаний, определяя тем самым сложность и мозаичность растительности. Растительный покров был несомкнутый, чередовался с пятнами оголенных грунтов, включал виды, разнообразные как по экологии (ксерофиты, мезофиты, гелиофиты и др.), так и по географическому происхождению (арктические, арктоальпийские, гипоарктические и бореальные). Идентифицированные по пыльце виды растений принадлежат к тундровым, луговым, лесным, криофильно-степным ценозам, сообществам щебнистых и каменистых грунтов, временным сообществам на нарушенных и несформированных грунтах.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что преимущественное распространение на территории исследования в позднеледниковье имели тундровые (главным образом ерниково-зеленомошные) палеосообщества. По данным О. Н. Шешинной [1980], карликовая береза отражена в СПС в 10 раз меньше, чем в растительном покрове. Зеленые мхи входили в состав таких палеосообществ, пик спор Bryales, возможно, обусловлен массовым распространением мхов вокруг водоема после понижения уровня воды в нем. Следует отметить, что максимум пыльцевой и споровой продуктивности часто приходится на начало внедрения новых видов [Елина, 1981]. Представители таксонов *Artemisia* и *Chenopodiaceae* имеют большую пыльцевую продуктивность и высокую транспортабельность, поэтому вклад пыльцы этих таксонов незначительно завышен [Бе-

резина и др., 2012]. Таким образом, доля перигляциальных полынно-маревых ксерофильных сообществ в растительном покрове была несколько ниже. Вполне вероятно, единично или небольшими группами встречался ольховник, береза Черепанова. Нельзя не отметить встречающуюся в спектрах пыльцу *Larix*. По причине строения экзины и крупных размеров пыльца *Larix* не обладает хорошей сохранностью и способностью к дальней ветровой транспортировке. Пыльцевые зерна встречаются, как правило, в непосредственной близости от продуцирующего их растения [Рашке, Савельева, 2017]. По всей вероятности, лиственница, предпочитающая каменистые, песчаные субстраты, континентальные климатические условия вполне могла произрастать на Андомской возвышенности. По данным В. Wohlfarth с коллегами [2002, 2007], средняя летняя температура в окрестностях оз. Тамбичозеро, расположенного приблизительно в 80 км к ЮВ, не превышала +3 °С.

Необходимо отметить, что в данных отложениях постоянно присутствует в достаточно большом количестве *Pediastrum kawraiski* Schmidle – представитель холодных, позднеледниковых водоемов. Незначительное количество пыльцы водных и прибрежно-водных видов обусловлено тем, что зарастание палеоводоема ограничивал высокий уровень воды, достаточно суровый климат позднеледниковья. Это подтверждает низкое содержание диатомей. Невозможность активной вегетации диатомовых водорослей обусловлена помимо низких температур большой мутностью воды вследствие интенсивного привноса терригенного материала в водоем. Поступление терригенных отложений связано с постоянным притоком талых ледниковых вод и активными процессами эрозии в условиях, когда грунты не были закреплены растительностью. Об активности этих процессов свидетельствуют значительное участие переотложенных морских диатомей и щелочные условия среды.

Как мы уже отмечали выше, согласно палинологическим данным условно границу между отложениями аллереда и позднего дриаса можно провести на глубине 510 см, с которой совпадает нижняя граница следующего этапа развития озера, отличающегося по составу и характеристике диатомового комплекса, присутствию переотложенных морских форм и разнообразному спектру *Pediastrum*. На основании данных диатомового анализа можно предположить, что климат стал более сухим, что и характерно для позднего дриаса. Об этом же может косвенно свидетельствовать увеличение вклада

пыльцы *Artemisia* вследствие появления новых нарушенных местообитаний, возникших при активизации процессов эрозии.

**Пребореальный период.** Основной тенденцией развития растительности в пребореале было увеличение площадей, занимаемых березовыми редколесьями. На возвышенных местоположениях, вершинах и склонах холмов, сложенных песками, к березе присоединялись сосна и лиственница, в наземном покрове произрастали верескоцветные кустарнички, злаки, плауны. Но участие тундровых палеосообществ (ПС) в растительном покрове было все еще велико. Второй пик спор Bryales, по всей вероятности, связан с заселением мхами берегов постепенно мелеющего озера. Увеличение доли пыльцы *Betula nana*, возможно, связано не с расширением площадей, занимаемых тундровыми ПС, а с распространением карликовой березки на заболоченных берегах водоема, где она находила убежище в условиях меняющегося климата. На мелководьях и берегах активно расселялись водно- и прибрежно-водные растения. Преобладающие в начале периода арктоальпийские и гипоарктические виды плаунов (*Diphasiastrum complanatum*, *Lycopodium pungens*) сменяются бореальными, довольно большое их количество свидетельствует о редкостности лесных сообществ. Доля перигляциальных полынно-маревых ценозов к концу периода уменьшается, но несколько увеличиваются площади, занятые ерниковыми ценозами. Тем не менее длительное время сохраняются реликты предшествующей эпохи (*Ephedra*, *Helianthemum*), и это свидетельствует, что растительный покров не был сомкнут. Изменение климата в сторону потепления и обмеление озера способствовали началу активного зарастания мелководий водоема *Alisma*, *Myriophyllum*, *Potamogeton*, *Nymphaea*, *Sparganium*, *Typha latifolia*, *T. angustifolia*.

Появление чувствительных к теплу водных и прибрежно-водных растений указывает на изменение гидроклиматических условий. Возросла тепло- и влагообеспеченность. Абсолютное господство планктонных форм, алкалифилов и космополитов также ярко отражает потепление и увлажнение климата, подъем уровня водоема, повышение его продуктивности. Средние температуры июля в этот период достигали +10 °С [Wohlfarth et al., 2002, 2007].

Мощность осадков по-прежнему весьма велика, что было обусловлено все еще активным привносом терригенного материала в условиях несомкнутого растительного покрова. Но уменьшение количества дочетвертичных спо-

роморф и пыльцы термофильных пород указывает на то, что площади с незакрепленными грунтами сокращаются.

Резко изменившийся характер спорово-пыльцевых спектров наряду со столь же резким, без плавного перехода, изменением генетического типа отложений (на глубине 2,10–2,14 м) может указывать на перерыв осадконакопления. Полученная радиоуглеродная дата  $7700 \pm 60$  (SU-3335) свидетельствует о формировании СПС палинозоны в начале атлантического периода. Данные диатомового анализа также фиксируют перерыв осадконакопления, в образце на гл. 2,10–2,08 м уже полностью господствовали типично болотные виды родов *Pinnularia* Ehr. (65 %) и *Eunotia* Ehr. (25 %), которые указывают на начало торфонакопления.

Причина этого явления может быть обусловлена следующими факторами:

- значительное потепление климата в пребореале и бореале привело к окончательному таянию мертвого льда, подпруживающего озеро. Это вызвало спуск вод озера и, вероятно, размыв осадков бореала. Впоследствии в обмелевшем озере начинают накапливаться торфы;
- из переполненной гляциокарстовой воронки произошел спуск накопившейся воды (в результате чего были смыты ранее накопившиеся осадки бореала).

Выше по разрезу в торфах диатомовая флора отсутствует, что говорит о дальнейшем развитии территории в субэаральных условиях (спуск вод, зарастание).

**Атлантический период.** Зональная растительность приобрела южнотаежный облик. В начале периода доминирующим компонентом растительного покрова были березовые леса, в которых все большее участие принимает ель, образуя еловые и березово-еловые сообщества, особый облик которым придают термофильные породы. К холмам, озерным террасам были приурочены светлохвойные ценозы, представленные *Pinus sylvestris* с примесью *Larix*. В локальной растительности болота произрастают виды осоковых, злаковых, *Betula nana*. К концу атлантического периода господствующими становятся темнохвойные леса, древостой которых обогащают широколиственные породы. Они тяготели к склонам холмов, межрядовым понижениям. Весьма значительно увеличивается доля сосновых лесов, которые были приурочены к возвышенным формам рельефа с легкими по механическому составу и хорошо дренированными почвами.

**Суббореальный период.** В растительном покрове доминируют еловые и сосново-еловые леса, участие термофильных пород в которых заметно сократилось. Леса приобретают облик среднетаежных.

**Субатлантический период.** Согласно полученным данным, в районе исследования произрастали еловые и сосново-еловые среднетаежные леса. Береза входила в состав сырых и заболоченных хвойных и мелколиственных лесов, произрастала на гарях и вырубках. Вполне вероятно, что увеличение количества пыльцы березы к верхней границе палинозоны было обусловлено вырубкой коренных хвойных лесов и сменой их мелколиственными сообществами.

## Заключение

Комплексное изучение разреза озерно-болотных отложений позволило восстановить этапы развития малого озера, расположенного на Андомской возвышенности, и выполнить реконструкцию динамики растительности в позднеледниковье и голоцене. Полученные данные показали, что формирование исследованной части осадков в водоеме началось в аллереде, то есть значительно позднее освобождения территории от поздневалдайского ледника. Неисследованная часть разреза (гл. 6,5–7,0 м, глины с прослойками органики и мелкозернистые глинистые пески) накапливалась, возможно, значительно раньше (в древнем дриасе?) – в невскую стадию или даже беллинге, чего нельзя точно утверждать из-за отсутствия данных. Несмотря на этот факт, имеет место запаздывание формирования озер в данном регионе по сравнению с временем отступления ледника (вепсовско-крестецкой стадии).

Такое запаздывание было обусловлено, вероятно, тем, что до позднеледниковья здесь были широко распространены массивы и глыбы мертвого льда, которые таяли вплоть до *бореального времени*. Холодные талые воды поступали в водоем в пульсирующем режиме. В позднеледниковье и пребореале происходило накопление терригенных осадков. Резкая смена их органогенными отложениями зафиксирована около 7700 л. н. Вполне вероятно, отложения бореального времени были смыты, что связано с окончательным таянием глыбы мертвого льда, подпруживавшей котловину. Данный факт подтверждается результатами спорово-пыльцевого, диатомового и химического анализов. Снижение уровня воды в водоеме привело к его зарастанию и дальнейшему заторфовыванию.

Длительное существование массивов мертвого льда оказало влияние на распространение растительности, которое также существенно запаздывало относительно отступления ледника. В позднеледниковье на территории исследования преобладали тундровые ерничково-зеленомошные палеосообщества. В пребореале появляются березовые редколесья, сменяющиеся березовыми редкостойными лесами. (Осадки бореала размыты.) В начале атлантического времени изучаемая территория была занята березовыми, а затем березово-еловыми южнотаежными лесами. Похолодание климата на границе атлантического и суббореального времени привело к распространению еловых и елово-сосновых среднетаежных лесов. К концу субатлантического периода в лесах возросла роль березы.

Таким образом, по смене СПС и диатомовых комплексов озерно-болотных отложений прослежено развитие озера и природы на данной территории в позднеледниковье и голоцене.

Ранее предполагалась модель последовательного отступления ледникового края с юго-востока на северо-запад, прерываемая остановками или даже кратковременными наступлениями ледника в холодные стадиалы позднеледниковья [Экман, 1987]. В ходе этих кратковременных наступлений ледника и сформировались комплексы краевых ледниковых образований, фиксирующих положение края ледника на разных временных срезах позднеледниковья. Однако, кроме хорошо выраженных краевых образований заключительных стадий оледенения сальпаусселькя в Западной и Центральной Карелии, положение края ледника в более ранние стадии дегляциации определено весьма условно как в пределах Карелии, так и в прилегающих с юга и с востока соседних районах. Здесь не выдержанные по простиранию напорные конечно-моренные гряды чередуются с обширными, изометричными в плане районами развития форм рельефа вытаивания мертвого льда (коиим является Андомская возвышенность, район исследований) [Демидов, 2005]. В то же время, по современным представлениям, формирование конечно-моренных гряд происходит в ходе наступления ледникового фронта, вызванного не только стадийными похолоданиями (так называемые вынужденные колебания), но и обусловленного локальными причинами, изменяющими баланс ледника, – рельефом ледникового ложа, наличием приледниковых водоемов, потеплением климата. Причем на разных участках ледникового фронта эти колебания его положения, названные релаксационными, могут в значитель-

ной степени различаться [Асеев, 1974; Каплянская, Тарноградский, 1993]. По имеющимся данным, со времени ледникового максимума значительное глобальное похолодание климата было только в позднем дриасе (ледниковые стадии сальпаусселькя) и кратковременное похолодание – в среднем дриасе (невская стадия). Их разделяли потепления интерстадиалов беллинг и аллеред. Таким образом, выделение более древних холодных ледниковых стадий, отделявшихся теплыми межстадиалами в Карелии и прилегающих территориях (вепсовской, крестецкой, лужской стадий и онегозерского интерстадиала), не имеет достаточных оснований [Демидов, 2005].

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).*

## Литература

- Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с.
- Березина Н. А., Демидова А. Н., Богатырев Л. Г., Петраш З. Н. Лишайники как объект изучения поверхностных спорово-пыльцевых спектров (на примере сосняков лишайниковых Владимирской области) // Труды XV Всероссийского микробиологического совещания «Современная микрорепалеонтология», Геленджик, 2012. С. 394–397.
- Бобров А. Е., Куприянова Л. А., Литвинцева М. В., Тарасевич В. Ф. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР / Ред. Л. А. Куприянова. Л.: Наука, 1983. 208 с.
- Генкал С. И., Чекрыжева Т. А., Комулайнен С. Ф. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии / Отв. ред. В. Г. Девяткин. ИБВВ РАН. М.: Научный мир, 2015. 202 с.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Демидов И. Н. Строение и формирование четвертичного покрова // Великий Андомский водораздел. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 12–18.
- Демидов И. Н. Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 134–142.
- Демидов И. Н., Лаврова Н. Б. Строение четвертичного покрова бассейна р. Водла (Восточная Карелия) и особенности развития растительности в поздне- и послеледниковье // Национальный парк «Водлозерский»: природное разнообразие и культурное наследие. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 49–60.

Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.

Елина Г. А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 159 с.

Косорукова Н. В., Кулькова М. А., Сапелко Т. В. Торфяниковая стоянка Погостище 15 по данным археологии и междисциплинарных исследований // Археологические вести. 2017. № 23. С. 67–83.

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 растений флоры европейской части СССР / Ред. Л. А. Куприянова. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 171 с.

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР / Ред. Л. А. Куприянова. Lamiaceae – Zygophyllaceae. Л.: Наука, 1978. 184 с.

Лаврова Н. Б. Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005а. Вып. 8. С. 143–148.

Лаврова Н. Б. Флора и растительность позднеледниковья Карелии (по данным спорово-пыльцевого анализа): Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2005б. 241 с.

Лукашов А. Д., Экман И. М. Деградация последнего оледенения и некоторые особенности маргинальной и островной ледниковой аккумуляции в Карелии. Природа и хозяйство Севера. Мурманск: Кн. изд-во, 1980. Вып. 7. С. 8–20.

Пыльцевой анализ / Под ред. И. М. Покровской. М.: Госгеолитиздат, 1950. 571 с.

Рашке Е. А., Савельева Л. А. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры и современная растительность дельты реки Лена, Российская Арктика // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 456–472. doi: 10.15372/SEJ20170407

Сапелко Т. В. Особенности формирования растительного покрова в поздне- и послеледниковье на юге Карелии // Вестник СПбГУ. 2002. Сер. 7, вып. 2, № 15. С. 103–108.

Сапелко Т. В. Динамика развития растительности на территории Кенозерского национального парка в голоцене // Известия РГО. 2006. Т. 138, вып. 3. С. 35–76.

Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Плотникова Е. В., Кулькова М. А. Изменение природных обстановок в голоцене на Онежско-Ладожском перешейке // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 2. С. 35–44.

Хомутова В. И. Пыльца и споры в донных отложениях озер Воже и Лача // Гидробиология озер Воже и Лача: В связи с прогнозом качества вод, перебираемых на юг / Под ред. И. М. Распопова. Л.: Наука, 1978. С. 236–254.

Шелехова Т. С. Эволюция малых озер юго-восточной Карелии в позднеледниковье и голоцене (по данным диатомового анализа) // Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии // Матер. науч.-практ. конф. (Минск, 20–24 октября 2003 г.). Минск, 2003. С. 179–181.

Шешина О. Н. О степени сходства палино- и фитоценозов и реставрации палеофитоценозов // Вестник МГУ. Сер. геол. 1980. № 4. С. 85–89.

Grimm E. S. TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics program // 8<sup>th</sup> International Palynological Congress. Program and Abstracts. Aix-en-Provence, France, 1992. 56 p.

Komárek J., Jankovska V. Review of the green algal genus Pediastrum: implication for pollen analytical research // Bibliotheca phycologica. Bd. 108. Berlin; Stuttgart, 2001. 127 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil. 1. Die Susswasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, 1986. 876 p.

Mölder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // Bull. Geol. Soc. Finland. 39: 199–217 (1967); 40: 151–170 (1968); 41: 235–251 (1969); 42: 129–144 (1970); 43: 203–220 (1971); 44: 141–149 (1972); 45: 159–179 (1973).

Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E. Pollen analysis. Second ed. London, Malden, Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.

Renberg I., Hellberg T. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments // Ambio. 1982. Vol. 11, no. 1. P. 30–33.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // Geol. Surv. Finland Bull. 274: 1–55 (1975); 284: 1–37 (1976); 296: 1–55 (1978); 312: 1–93 (1980).

Wohlfarth B., Filimonova L., Bennike O., Björkman L., Lavrova N., Demidov I., Possnert G. Late-Glacial and Early Holocene environmental and climatic change at Lake Tambichozero, Southeastern Russian Karelia // Quaternary Research. 2002. No. 58. P. 261–272. doi: 10.1006/qres.2002.2386

Wohlfarth B., Schwark L., Bennike O., Filimonova L., Tarasov P., Björkman L., Brunnberg L., Demidov I., Possnert G. Unstable early-Holocene climatic and environmental conditions in northwestern Russia derived from a multidisciplinary study of a lake-sediment sequence from Pichozero, southeastern Russian Karelia // The Holocene. 2004. Vol. 14, no. 5. P. 732–746. doi: 10.1191/0959683604hl751rp

Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O., Subetto D., Tarasov P., Demidov I., Filimonova L., Sapelko T. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review // Quaternary Science Reviews. 2007. No. 26. P. 1871–1883. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.04.005

Поступила в редакцию 08.05.2018

## References

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayu-

shchei sredi [Biodiversity of algae – indicators of environment]. Tel'-Aviv: PilliesStudio, 2006. 498 p.

Berezina N. A., Demidova A. N., Bogatyrev L. G., Petrash Z. N. Lishainiki kak ob"ekt izucheniya poverkhnostnykh sporovo-pyl'tsevykh spektrov (na primere sosnyakov lishainikovykh Vladimirskoi oblasti) [Lichens as objects of surface pollen spectra research (the case of lichen pine forest in the Vladimir Region)]. *Tr. XV Vseross. mikropaleontologicheskogo soveshch. «Sovremennaya mikropaleontologiya»* [Proceed. XV All-Russ. micropaleontological meeting *Modern micropaleontology*]. Gelendzhik, 2012. P. 394–397.

Bobrov A. E., Kupriyanova L. A., Litvintseva M. V., Tarasevich V. F. Spory paprotnikoobraznykh i pyl'tsa golosemennykh i odnodol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Spores of Pteridophyta and pollen gymnosperms and monocots plants of the flora in the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1983. 208 p.

Demidov I. N. Stroenie i formirovanie chetvertichnogo pokrova [Structure and formation of the Quaternary cover]. *Velikii Andomskii vodorazdel* [Great Andoma watershed]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. P. 12–18.

Davydova N. N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene [The diatoms as indicator of basin environmental conditions in Holocene]. Leningrad: Nauka, 1985. 244 p.

Demidov I. N. Degradatsiya pozdnevaldaiskogo oledeneniya v basseine Onezhskogo ozera [Degradation of the Late Valdai Glaciation in the Onega Lake basin]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and useful minerals of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. Iss. 8. P. 134–142.

Demidov I. N., Lavrova N. B. Stroenie chetvertichnogo pokrova basseina r. Vodla (Vostochnaya Kareliya) i osobennosti razvitiya rastitel'nosti v pozdne- i poslelednikov'e [Structure of the Quaternary cover of the Vodla River basin (Eastern Karelia) and features of vegetation development in the Late Glacial and Post-Glacial periods]. *Natsional'nyi park Vodlozerskii: prirodnoe raznoobrazie i kul'turnoe nasledie* [Vodlozero National Park: natural diversity and cultural heritage]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. P. 49–60.

Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye) [Diatoms of the USSR (fossils and modern)]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1974. 403 p.

Elina G. A. Printsipy i metody rekonstruktsii i kartirovaniya rastitel'nosti golotsena [Principles and methods of reconstruction and mapping of the vegetation in the Holocene]. Leningrad: Nauka, 1981. 159 p.

Genkal S. I., Chekryzheva T. A., Komulainen S. F. Diatomovye vodorosli vodoemov i vodotokov Karelii [Diatoms of water bodies and water courses in Karelia]. Moscow: Nauchnyi mir, 2015. 202 p.

Khomutova V. I. Pyl'tsa i spory v donnykh otlozheniyakh ozer Vozhe i Lacha [Pollen and spores in bottom sediments in Lakes Vozhe and Lacha]. *Gidrobiol. ozer Vozhe i Lacha: V svyazi s prognozom kachestva vod, perebrasyvaemykh na yug* [Hydrobiol. of Lakes Vozhe and Lacha: in view of the quality prediction of the waters moved to the south of Karelia]. Leningrad, 1978. P. 236–254.

Kosorukova N. V., Kul'kova M. A., Sapelko T. V. Torfyanikovaya stoyanka Pogostishche 15 po dannym arkheologii i mezhdistsiplinarnykh issledovaniy [Peatbog site of Pogostishche-15 in the light of archaeological

and interdisciplinary studies]. *Arkheologicheskie vesti* [Archaeological News]. 2017. No. 23. P. 67–83.

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 rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Pollen and spores of plants of the flora in the European part of the USSR]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1972. 171 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa dvudol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Pollen of dicotyledon plants of the flora in the European part of the USSR]. *Lamiaceae – Zygophyllaceae*. Leningrad: Nauka, 1978. 184 p.

Lavrova N. B. Razvitie rastitel'nosti basseina Onezhskogo ozera v khode degradatsii poslednego oledeneniya [Development of vegetation of the Lake Onega basin in the course of degradation in the Last Glacial Period]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and useful minerals of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005a. Iss. 8. P. 143–148.

Lavrova N. B. Flora i rastitel'nost' pozdnelednikov'ya Karelii (po dannym sporovo-pyl'tsevogo analiza) [Flora and vegetation of the Late Glaciation Period in Karelia (according to the spore-pollen analysis data)]: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Petrozavodsk, 2005b. 241 p.

Lukashov A. D., Ekman I. M. Degradatsiya poslednego oledeneniya i nekotorye osobennosti marginal'noi i ostrovnoi lednikovoi akkumulyatsii v Karelii. Priroda i khozyaistvo Severa [Degradation of the Last Glaciation and some features of marginal and island glacial accumulation in Karelia. Nature and economy of the North]. Iss. 7. Murmansk: Kn. izd-vo, 1980. P. 8–20.

Pokrovskii I. M. (ed.). Pyl'tsevoi analiz [Pollen analysis]. Moscow: Gosgeolizdat, 1950. 571 p.

Rashke E. A., Savel'eva L. A. Subrezentnye sporovo-pyl'tsevye spektry i sovremennaya rastitel'nost' del'ty reki Lena, Rossiiskaya Arktika [Subrecent spore-pollen spectra and modern vegetation from the Lena River Delta, Russian Arctic]. *Sibirskii ekol. zhurn.* [Contemporary Probl. of Ecol.]. 2017. No. 4. P. 456–472. doi: 10.15372/SEJ20170407

Sapelko T. V. Osobennosti formirovaniya rastitel'nogo pokrova v pozdne- i poslelednikov'e na yuge Karelii [Features of vegetation cover formation in the Late and Post-Glacial Periods in the south of Karelia]. *Vestnik SPbGU* [Vestnik of St. Petersburg Univ.]. 2002. Ser. 7, iss. 2, no. 15. P. 103–108.

Sapelko T. V. Dinamika razvitiya rastitel'nosti na territorii Kenozerskogo natsional'nogo parka v golotsene [Dynamics of vegetation development in the Kenozero National Park in the Holocene]. *Izvestiya RGO* [Proceed. Russ. Geographical Society]. 2006. Vol. 138, iss. 3. P. 35–76.

Sapelko T. V., Kuznetsov D. D., Plotnikova E. V., Kul'kova M. A. Izmenenie prirodnykh obstanovok v golotsene na Onezhsko-Ladozhskom peresheike [Change of environmental conditions in the Holocene at Onega-Ladoga Isthmus]. *Izvestiya RGO* [Proceed. Russ. Geographical Society]. 2016. Vol. 148, iss. 2. P. 35–44.

Shelekhova T. S. Evolyutsiya malykh ozer yugo-vostochnoi Karelii v pozdnelednikov'e i golotsene (po dannym diatomovogo analiza) [Evolution of small lakes

in south-eastern Karelia in the Late Glacial Period and Holocene (according to the diatom analysis data)]. *Teor. i priklad. probl. sovr. limnologii. Mat. nauchno-praktich. konf. (Minsk, 20–24 okt. 2003)*. [Theoretical and applied problems of modern limnology. Proceed. sci.-pract. conf. (Minsk, October 20–24, 2003)]. Minsk, 2003. P. 179–181.

*Sheshina O. N.* O stepeni skhodstva palino- i fitotseznozov i restavratsii paleofitotseznozov [On the similarity of palin- and phytocenoses and paleophytocenoses restoration]. *Vestnik MGU. Ser. Geol* [Moscow Univ. Geol. Bull.]. 1980. No. 4. P. 85–89.

*Grimm E. S.* TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics program. *8<sup>th</sup> International Palynological Congress. Programm and Abstracts*. Aix-en-Provence, France, 1992. 56 p.

*Komárek J., Jankovska V.* Review of the green algal genus *Pediastrum*: implication for pollen analytical research. *Bibliotheca phycologica*. Bd 108. Berlin; Stuttgart, 2001. 127 p.

*Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. Teil. 1. Die Susswasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, 1986. 876 p.

*Mölder K., Tynni R.* Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII. *Bull. Geol. Soc. Finland*. 39: 199–217 (1967); 40: 151–170 (1968); 41: 235–251 (1969); 42: 129–144 (1970); 43: 203–220 (1971); 44: 141–149 (1972); 45: 159–179 (1973).

*Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E.* Pollen analysis. Second ed. London, Malden, Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.

*Renberg I., Hellberg T.* The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments. *Ambio*. 1982. Vol. 11, no. 1. P. 30–33.

*Tynni R.* Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI. *Geol. Surv. Finland Bull*. 274: 1–55 (1975); 284: 1–37 (1976); 296: 1–55 (1978); 312: 1–93 (1980).

*Wohlfarth B., Filimonova L., Bennike O., Björkman L., Lavrova N., Demidov I., Possnert G.* Late-Glacial and Early Holocene environmental and climatic change at Lake Tambichozero, Southeastern Russian Karelia. *Quaternary Research*. 2002. No. 58. P. 261–272. doi: 10.1006/qres.2002.2386

*Wohlfarth B., Schwark L., Bennike O., Filimonova L., Tarasov P., Björkman L., Brunnberg L., Demidov I., Possnert G.* Unstable early-Holocene climatic and environmental conditions in northwestern Russia derived from a multidisciplinary study of a lake-sediment sequence from Pichozero, southeastern Russian Karelia. *The Holocene*. 2004. Vol. 14, no. 5. P. 732–746. doi: 10.1191/0959683604hl751rp

*Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O., Subetto D., Tarasov P., Demidov I., Filimonova L., Sapelko T.* Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review. *Quaternary Science Reviews*. 2007. No. 26. P. 1871–1883. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.04.005

Received May 08, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Шелехова Татьяна Станиславовна**

старший научный сотрудник лаборатории 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

### **Лаврова Надежда Борисовна**

научный сотрудник, к. б. н. Институт геологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН» ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910 эл. почта: lavrova@krc.karelia.ru тел.: 89214545451

## 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

### **Lavrova, Nadezhda**

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: lavrova@krc.karelia.ru tel.: +7921454545

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.4.062.2

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ ОЗЕР

Н. Н. Филатов<sup>1</sup>, А. В. Исаев<sup>2</sup>, О. П. Савчук<sup>3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт наук о земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

<sup>4</sup> Институт Балтик Нест, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета, Швеция

Изменения гидрологического режима и экосистем Ладожского и Онежского озер исследовались по данным натуральных наблюдений и моделирования биогеохимических потоков вещества. Разработана модель экосистемы озера в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенов в донных отложениях. Выполнены диагностические (1996–2015 гг.) и прогностические (2016–2040 гг.) оценки возможных изменений термогидродинамики и экосистемы Ладожского озера. Начальные и граничные условия для численных экспериментов задавались по данным натуральных наблюдений. Сравнение результатов моделирования с наблюдениями показало удовлетворительное соответствие пространственно-временной динамики гидрофизических и биогеохимических характеристик. Показаны возможные изменения гидрофизических процессов, первичной продукции и биогеохимических потоков вещества в Ладожском озере до 2040 г. при изменении климата по сценарию А1В. Модель может быть использована для исследования экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в экосистемах крупных стратифицированных озер в условиях изменения климата и антропогенных воздействий.

Ключевые слова: крупные озера; современное состояние; математическое моделирование; экосистема; будущие изменения.

#### **N. N. Filatov, A. V. Isaev, O. P. Savchuk. ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE AND FORECASTING OF CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME AND ECOSYSTEMS OF LARGE LAKES**

Changes in the hydrological regimes and ecosystems of lakes Ladoga and Onego were studied using *in situ* data and simulations of biogeochemical nutrient fluxes. A lake ecosystem model has been developed, representing the biogeochemical cycling matter by transport and transformation processes, taking into account the dynamics of nutrients

in bottom sediments. Diagnostic (1996–2015) and prognostic (2016–2040) assessments of possible changes in the hydrodynamic conditions and ecosystem of Ladoga Lake were carried out. The initial and boundary conditions for the numerical experiments were set according to field observations. The comparison of simulated and observed results showed a satisfactory match of the spatial-temporal dynamics of hydrophysical and biogeochemical characteristics. Possible changes in the hydrophysical processes, primary production, and biogeochemical nutrient fluxes in Lake Ladoga until 2040 under climate change scenario A1B are shown. The model can be used to study processes in the ecosystem and the biogeochemical cycles occurring in ecosystems of large stratified lakes under climate change and human impact.

**Keywords:** large lakes; current state; mathematical modeling; ecosystem; future changes.

## **Введение**

Одна из важных проблем современной лимнологии – диагноз состояния и долгосрочное прогнозирование состояния водных экосистем крупных озер для планирования экономической деятельности, рационального использования и охраны внутренних водоемов. При наличии многих пользователей ресурсов крупных озер, таких как энергетика, водный транспорт, питьевое и промышленное водоснабжение, биоресурсы, рекреация, требуется разработать соответствующие интегрированные системы управления. При отсутствии таких систем, включающих необходимые математические модели, возникают серьезные проблемы рационального использования ресурсов водоемов, как это имело место для озера Байкал в 2015–2017 гг. в условиях маловодья [Синюкович, Чернышев, 2018].

Для создания систем управления для крупнейших озер России, таких как Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское, требуются данные, знания об объектах управления, а также соответствующие математические модели. Для Ладожского и Онежского озер (далее – Ладога и Онего) такие модели были созданы более 10 лет назад в СПб ЭМИ РАН с использованием экспериментальных данных и знаний, полученных в ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН [Rukhovets, Filatov, 2010; Руховец и др., 2011; Ладога, 2013]. Разработка и последующее развитие трехмерных моделей термогидродинамики и функционирования экосистем Ладоги и Онего позволили воспроизвести процесс антропогенного эвтрофирования, определить ассимиляционный потенциал и предельные допустимые значения поступления фосфора и азота для сохранения и восстановления трофического статуса этих озер извне [Руховец и др., 2011; Меншуткин и др., 2013]. Однако в моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН, недостаточно корректно задавались атмосферные воздействия, слабо описывался ледовый режим, не рассмат-

ривались механизмы пространственно-временных изменений концентраций и биомасс компонентов экосистем, воспроизводимых моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации. Появилась потребность разработать трехмерные модели термогидродинамики и экосистем озер, лишенные указанных выше недостатков.

Важной проблемой лимнологии является оценка вклада антропогенных и природных, в том числе и климатических, факторов в изменение экосистем озер. Однако сделать это только с использованием анализа данных натуральных экспериментов не представляется возможным, поскольку экосистема озера в природных условиях не является полностью наблюдаемой системой, в то время как математическому моделированию в принципе доступны все элементы экосистемы озер. При создании моделей экосистем крупнейших озер России важно было учесть последовательность обнаруженных стадий деструктивных сукцессий, закономерности реакции биоты на определенные уровни воздействия на экосистемы, которые были получены по данным многолетних натуральных наблюдений.

## **Диагноз гидрологического режима экосистем по натурным наблюдениям**

Экспериментальные исследования ИНОЗ РАН [Петрова и др., 2005, 2010] и ИВПС КарНЦ РАН [Филатов и др., 2015] показали, что процесс трансформации экосистем Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялся вклад внешних антропогенных и климатических факторов, изменилась роль внутриводоемных процессов.

Увеличение фосфорной нагрузки на Ладожское озеро с начала 1960-х годов привело к эвтрофированию водоема [Петрова и др.,

2010]. Последующее резкое снижение фосфорной нагрузки в 90-х годах XX века не привело к быстрому возвращению озера к мезо- и олиготрофному состоянию. Основной причиной этого было ускорение процесса регенерации биогенных элементов, описанного по данным натуральных наблюдений и воспроизведенного на математической модели [Ладога, 2013; Филатов и др., 2015]. Натурные экспериментальные исследования позволили предположить, что в результате активизации микробиологических процессов, включая разложение органического вещества водными грибами, произошло вовлечение в оборот ранее накопленных в озере биогенов [Иофина, 1992; Филатов и др., 2015]. Как отмечают Н. А. Петрова с соавторами [2010], «Резкое снижение поступления фосфора в озеро в 90-х гг. XX в. увеличило дисбаланс экосистемы... В последние годы отмечается принципиально новый этап функционирования экосистем озера при преобладании деструкционных процессов над продукционными... Экосистемы Ладожского озера пережили период быстрых изменений и вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов в новых условиях уменьшения антропогенной нагрузки и потеплений климата».

Исследования Онежского озера показали, что изменение гидрологического режима из-за регулирования уровня воды озера в конце 50-х годов XX века Верхне-Свирской ГЭС составляет всего несколько десятков сантиметров и они мало повлияли на экосистему озера. Напротив, увеличение биогенной нагрузки и сброс загрязнений в 1960–1990 гг. привели к эвтрофированию и загрязнению водоема. Натурные исследования показали, например, что в разные годы в Онежском озере процесс антропогенного эвтрофирования проходил по разному типу: гетеротрофному или автотрофному [Филатов и др., 2015]. Увеличение уровня трофии ряда губ (Петрозаводской, Кондопожской) Онежского озера сопровождалось снижением стабильности фитопланктона и перестройкой его структуры, направленной на изменение соотношения крупно- и мелкоклеточных видов в сторону увеличения доли последних, имеющих более широкие возможности адаптации к меняющимся условиям окружающей среды [Калинкина и др., 2018]. Сообщество зоопланктона в центральных олиготрофных районах Онежского озера находилось в динамическом равновесии и было устойчиво. При резком уменьшении антропогенной нагрузки после 1991 г. экосистема Онежского озера, как и Ладожского, медленно восстанавливается. Современное состояние биоценозов Онежского озера в целом отражает

последовательные изменения под воздействием антропогенных факторов – от первоначального повышения продуктивности до заметной трансформации их структуры.

Таким образом, экосистемы этих водоемов пережили период быстрых изменений и в 1990–2000 гг. вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов [Меншуткин и др., 2015; Филатов и др., 2015].

Ранее по данным математического моделирования и натуральных наблюдений [Петрова и др., 2010; Rukhovets, Filatov, 2010; Ладога, 2013] отмечалось, что основной вклад в эвтрофирование Ладожского и Онежского озер вносили антропогенные факторы. При потеплении климата изменения в развитии фитопланктона были заметны только в осенний период, а неоднородности в развитии зоопланктона не превосходили величин, объясняемых изменениями биогенной нагрузки [Rukhovets, Filatov, 2010]. Однако в последние три декады при потеплении заметно возросла роль климата в изменениях водных экосистем по сравнению с антропогенными [Калинкина и др., 2018; Filatov et al., 2018]. В настоящее время при потеплении климата на водосборе отмечается рост температуры поверхностного слоя воды Ладожского и Онежского озер, изменение сроков вегетационного периода [Filatov et al., 2018]. На водосборе Ладожского и Онежского озер за период 1951–2016 гг. отмечено повышение годовой температуры воздуха на 1,2 °С, суммарного испарения – на 70–80 мм, сумм атмосферных осадков – на 60–90 мм. В качестве климатической нормы использовалось среднее многолетнее значение за 1961–1990 гг. На водосборе озер с конца 80-х годов XX века наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев [Назарова, 2010]. В изменчивости температуры воздуха отмечаются квазициклические колебания с временными масштабами от более 30 до нескольких лет. Также за период 1990–2015 гг. отмечается заметный положительный тренд в температуре приповерхностного слоя воды (ТПВ) Ладоги и Онего. Для Ладожского озера увеличение ТПВ составляло для июня–октября от 1,5 до 4,0 °С, а для Онего – от 1,5 до 2,4 °С [Filatov et al., 2018]. За 100 лет наблюдений в среднем на две недели увеличилось число дней, когда поверхность озер свободна ото льда.

При значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют (рис. 1, а), рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения (рис. 1,

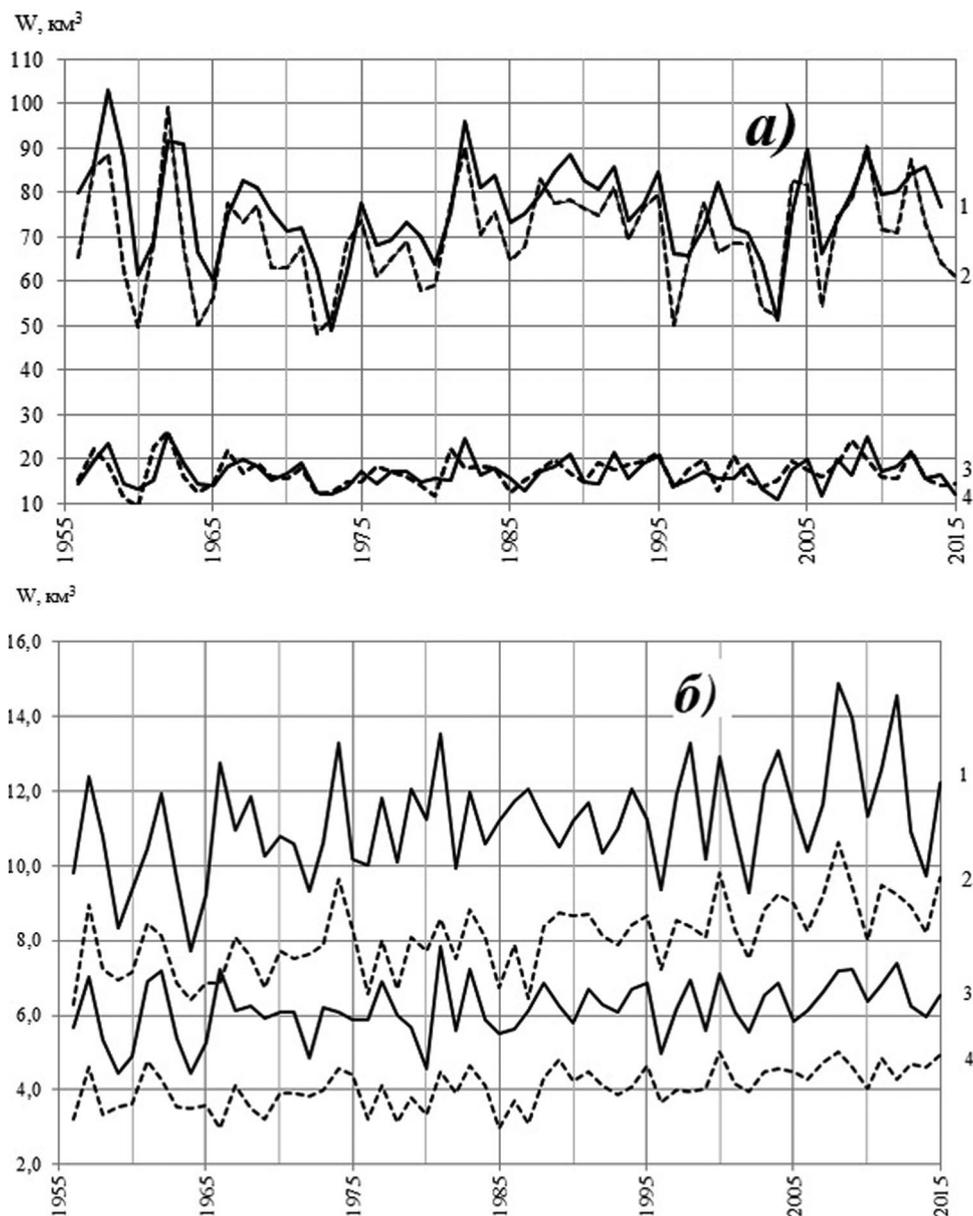


Рис. 1. Изменчивость элементов водного баланса Ладожского и Онежского озер 1955–2016 гг.:

а) 1 – сток реки Невы, 2 – интегральный речной сток в Ладожское озеро; 3 – сток из Онежского озера с рекой Свирь, 4 – интегральный речной сток в Онежское озеро; б) 1 – осадки на зеркало Ладожского озера, 2 – испарение с зеркала Ладожского озера, 3 – осадки на зеркало Онежского озера, 4 – испарение с зеркала Онежского озера

Fig. 1. Variability of water balance elements of Lakes Ladoga and Onego in 1955–2016:

а) 1 – Neva river runoff, 2 – integral river runoff to Lake Ladoga; 3 – runoff from Lake Onego with the Svir River, 4 – integral river runoff to Lake Onego; б) 1 – precipitations on the surface of Lake Ladoga, 2 – evaporation from the surface of Lake Ladoga, 3 – precipitations on the surface of Lake Onego, 4 – evaporation from the surface of Lake Onego

б). Но при потеплении климата и увеличении стока с водосбора в зимний период происходят изменения в формировании гидрохимического режима озер, которые отражаются на увеличении цветности воды, содержании железа и фосфора в гумусовых комплексах, обилии и структуре водных сообществ [Калинкина и др., 2018].

### Постановка задачи и результаты прогнозирования экосистем Ладожского озера при возможном изменении климата

Демонстрация возможностей современных моделей биогеохимического круговорота вещества для исследования современного со-



Рис. 2. Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества [по: Владимирова и др., 2018]

Fig. 2. Scheme of the model variables and matter streams interaction [after: Vladimirova et al., 2018]

стояния и прогнозирования будущего состояния озера выполнена на примере Ладожского озера, поскольку для этого водоема имеется многолетний опыт моделирования экосистем [Меншуткин и др., 2015]. К тому же Ладога, по сравнению с Онега, имеет менее сложную морфометрию и конфигурацию береговой зоны, лучше обеспечена данными по биогенной нагрузке, сведениями о первичной продукции фитопланктона. Разработанную на примере Ладоги трехмерную модель в дальнейшем предполагается использовать для Онежского и других крупных озер России с учетом специфики их экосистем.

Принципиально важной задачей было описать механизмы изменений в экосистемах, воспроизводимые моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов. На указанных принципах авторами в рамках гранта РФ № 14–17–00740 впервые для Ладожского озе-

ра была применена трехмерная модель биогеохимических круговоротов вещества. При этом была использована и адаптирована для пресного водоема – Ладожского озера – отечественная модель эвтрофикации (SPBEM) [Savchuk, 2002; Рябченко, 2016], которая успешно применялась ранее для оценки современного состояния и прогноза изменений экосистемы Балтийского моря в целом и Финского залива в частности [Рябченко, 2016; Isaev, 2017; Владимирова и др., 2018].

В настоящей работе кратко представим постановку задачи моделирования биогеохимических круговоротов в Ладожском озере и прогностические оценки изменения экосистемы озера при потеплении климата до 2040 г., как пример возможности использования подобного класса моделей для климатических прогнозов пресноводных экосистем.

Отечественная Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) основана на анализе биогеохимических потоков вещества, которыми и определяется динамика интегральных запасов биогенных элементов в отдельных частях и компонентах экосистемы, включая донные отложения (рис. 2).

### *Описание модели биогеохимического круговорота Ладожского озера*

Основное внимание уделено биогеохимическим круговоротам биогенных элементов и растворенного кислорода, а также функционированию фито- и зоопланктона. Используется модель биогеохимических циклов, разработанная О. П. Савчуком [Savchuk, 2002; Gustafsson et al., 2017]. Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества представлена в работе [Владимирова и др., 2018]. На рис. 2 показаны 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.

В модели гетеротрофы питаются автотрофами и взвешенным органическим веществом. Часть извлеченной из воды пищи усваивается, а неусвоенная часть пополняет запасы детрита. Биомасса гетеротрофов уменьшается за счет естественной смертности и выделения в воду продуктов обмена веществ.

Биомасса автотрофов увеличивается в результате фотосинтеза за счет утилизации минеральных соединений азота и фосфора и вследствие азотфиксации и уменьшается за счет естественной смертности, гравитационного оседания, а также выедания гетеротрофами. Концентрация взвешенного органического вещества (детрита) увеличивается благодаря процессам, перечисленным выше, и уменьшается в результате деструкции взвешенного органического вещества до растворенного и гравитационного оседания детрита.

Изменения во времени лабильного растворенного органического азота и фосфора определяются поступлением за счет деструкции детрита, трансформации стойкого растворенного органического вещества до лабильного, за счет процесса фототрансформации, а также части экскреции гетеротрофов. Расходуется лабильное органическое вещество в процессе минерализации. Стойкое органическое растворенное вещество пополняет запасы за счет небольшой части экскреции гетеротрофов и расходуется в результате фототрансформации.

Запасы питательных соединений пополняются за счет минерализации растворенного органического вещества, экскреции гетеротрофов и в результате обмена с донными отложениями, а потребляются автотрофами, в том числе, в случае фосфатов, расходуются и на азотфиксацию сине-зелеными водорослями. Аммоний нитрифицируется до нитратов,

а последние в гипоксических условиях денитрифицируются до молекулярного азота. Растворенный кислород вырабатывается в результате фотосинтеза и расходуется в ходе биохимических процессов окисления: дыхания гетеротрофов, минерализации органического вещества в воде и в донных отложениях, нитрификации. Использование кислорода нитратов в ходе денитрификации при окислении органического вещества рассматривается как процесс, возмещающий соответствующие затраты растворенного кислорода. Запасы азота и фосфора в бентали увеличиваются вследствие оседания автотрофов и органического вещества под воздействием силы тяжести и расходуются при минерализации. При этом в зависимости от окислительно-восстановительных условий большая или меньшая часть фосфора удерживается в донных отложениях, а определенная часть азота покидает систему в виде адсорбированных ионов аммония и в результате денитрификации. Некоторая часть биогенов выводится из моделируемой области в результате захоронения.

Для воспроизведения экосистемы Ладожского озера модель биогеохимических циклов была сопряжена с моделью гидротермодинамики MITgcm (<http://mitgcm.org>), разработанной в Массачусетском технологическом университете. Модульная система комплекса позволяет собрать необходимую конфигурацию для исследуемого объекта. Выбор модели гидротермодинамики объясняется успешностью ее применения для воспроизведения гидротермодинамики больших стратифицированных озер [Bennington и др., 2010; Dorostkar и др., 2010], а также возможностью свободного доступа к исходному коду модели.

Для воспроизведения гидротермодинамики Ладожского озера использовалась следующая конфигурация модели: основной набор пакетов, отвечающий за численное решение уравнений гидротермодинамики; схема замыкания вертикальной турбулентности TKE [Gaspar et al., 1990] (пакет GGL90); уравнение состояния TEOS2010; пакет Sealce (моделирование льда), для условий Ладожского озера задавалась нулевая соленость льда; коэффициенты горизонтального турбулентного обмена задавались константами.

Задача решалась в сферической системе координат с горизонтальным разрешением 2 морские мили, по вертикали задавалось 42 уровня, первые 30 метров через 3 метра, далее шаг по глубине составлял 5 метров.

Необходимые для решения задачи поля – атмосферного давления, температуры воздуха,

компонентов скорости ветра, потоков коротковолновой и длинноволновой приходящей радиации, осадков и влажности воздуха – для современного периода (1996–2015 гг.) брались из архива ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int>). Для задания атмосферного воздействия в будущем климате (2018–2040 гг.) использовались данные, полученные на основе расчетов по региональной климатической модели Центра Росси Шведского метеорологического и гидрологического института RCAO [Döscher, 2002], а на боковых границах для модели RCAO были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM Института метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [Jungclaus, 2006; Roeckner, 2006]. Воспроизведение состояния озера в будущем климате основывалось на сценарии эмиссии парниковых газов A1B [Solomon, 2007].

#### *Граничные условия*

В качестве граничных условий в современный период задавались данные о речном стоке и нагрузках азотом и фосфором по: [Ладога, 2013]. При расчетах в будущем климате речной сток и биогенные нагрузки задавались как средние за последние 5 лет современного периода.

#### *Начальные условия*

В качестве начальных условий использовались 3D-поля температуры, минеральных и органических форм азота, фосфора и кремния, которые были получены в результате «разгонного» расчета на модели в течение 12 лет, что соответствует условному периоду водообмена Ладожского озера [Филатов, 1991], с повторяющимися полями атмосферного воздействия и при биогенных нагрузках, которые соответствовали условиям 1996 года.

#### *Период расчетов*

В литературе, посвященной исследованию Ладожского озера, детально описан процесс трансформации экосистемы Ладожского озера. В этих исследованиях показано, что, несмотря на снижение фосфорной нагрузки, снижения первичной продукции водоема не наблюдается. Объяснение данному явлению дано Петровой с соавторами [2005, 2010]. В этих работах на основе данных наблюдений показано, что в период повышенной фосфорной нагрузки (1976–1991 гг.) в акватории озера увеличи-

лась численность бактериопланктона и водных грибов, что было параметризовано в модели как увеличение скорости внутриводоемного оборота фосфора [Руховец и др., 2010, 2011]. Анализ литературных источников показывает, что к 1996 году экосистема Ладожского озера уже адаптировалась к увеличению численности деструкторов органического вещества. Поэтому расчет современного состояния экосистемы озера выполнялся для периода 1996–2015 гг. Кроме вышесказанного выбор периода связан с доступностью данных по нагрузкам биогенами. Будущий климат рассчитывался для периода 2015–2040 гг.

### **Сравнение результатов моделирования в современный период с данными натурных наблюдений**

Наиболее значимой гидрофизической характеристикой, определяющей внутригодовую эволюцию экосистемы озера, является температура воды. На рис. 3 представлено сравнение годового хода температуры, осредненного с 1999 по 2011 г., с данными натурных измерений [Ладога, 2013]. Период осреднения модели выбран исходя из соображений близости к используемым в [Ладога, 2013] данным натурных наблюдений, на основе которых был получен средний сезонный ход температуры воды озера.

Анализ рис. 3 показывает, что модель корректно воспроизводит основные особенности термического режима озера, а именно время наступления весенней и осенней изотермии, период максимального прогрева, толщину перемешанного слоя. Недостаточное проникновение вод с температурой около 2 °C и менее в глубину в зимний период можно объяснить тем, что используемое горизонтальное разрешение модели не позволяет воспроизводить склоновую конвекцию, которой объясняется проникновение холодных вод на глубины 100–120 метров.

Поскольку продуктивность экосистемы Ладожского озера лимитирована фосфором, то в первую очередь при настройке модели необходимо исследовать способность модели к воспроизведению динамики круговорота фосфора. На рис. 4 представлено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений [Ладога, 2013] средних за период открытой воды концентраций общего фосфора и фосфатов. Из рисунка видно, что модель хорошо воспроизводит межгодовую динамику содержания фосфора в водной среде озера.

Опубликованные в работе [Летанская, 2012] данные о биомассе фитопланктона за период

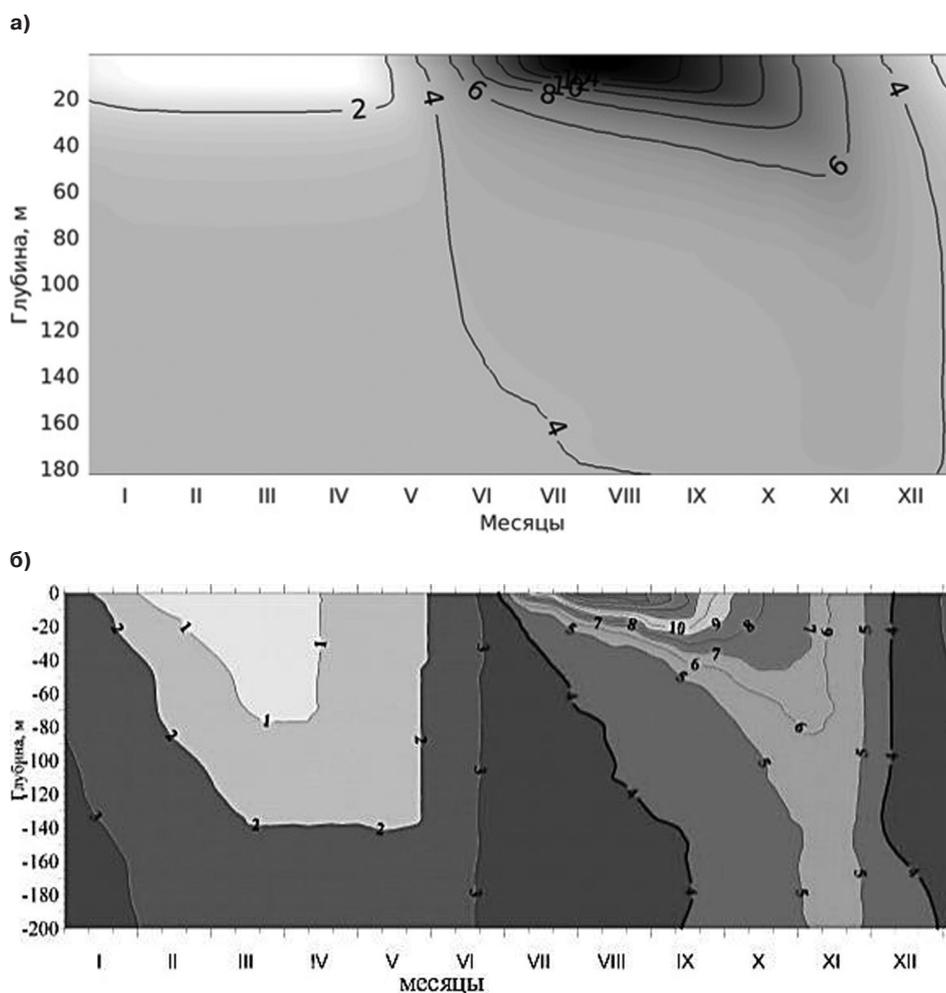


Рис. 3. Годовой ход температуры воды по результатам моделирования (а) и данным натурных измерений (б) [Ладога, 2013]

Fig. 3. Annual water temperature curve according to the modeling results (a) and field measurement data (b) [Ladoga, 2013]

1996–2009 гг. составляют  $1,66 \text{ г/м}^3$  при стандартном отклонении  $0,3 \text{ г/м}^3$ . В модели биомасса выражена в азотных единицах. Для сравнения с данными наблюдений пересчет модельных результатов из азотных единиц в сырую биомассу осуществлялся в соответствии с методологией, предложенной в работе [Savchuk, 2002]. Смоделированные значения биомассы, пересчитанные в сырой вес, за тот же период составляют  $1,27 \text{ г/м}^3$  при стандартном отклонении  $0,24 \text{ г/м}^3$ .

Доступные опубликованные данные о величине первичной продукции [Ладога, 2013] показывают, что среднее значение первичной продукции в летний период с 1993 по 2003 годы составляла  $400 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ , модельные значения первичной продукции, осредненные за летний период с 1996 по 2003 гг., составляли  $350 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$  при стандартном отклонении  $120 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ .

По оценочным данным выход фосфора из донных отложений составляет 875 тонн в год [Игнатъева, 1997], по результатам моделирования среднее значение выхода фосфора за современный период составляет 604 тонны в год. Средний вынос фосфора с рекой Невой, осредненный за период с 1999 по 2011 гг., составляет 1249 тонн в год. В работе [Руховец и др., 2011] вынос фосфора с Невой по данным наблюдений для периода 1996–2000 гг. составляет 1320 тонн в год, в работе [Ершова, 2013] – 1000 тонн в год для 2009 года.

К сожалению, более подробных данных, позволяющих детальнее провести верификацию модели, авторам найти не удалось, поскольку в 1991–2006 гг. из-за недостатка финансирования наблюдения на озере были ограничены, а в 2007–2011 гг. выполнялись один раз в период навигации на 16 станциях [Ипатова, 2017]. Однако проведенное сравнение с опубликованными данными

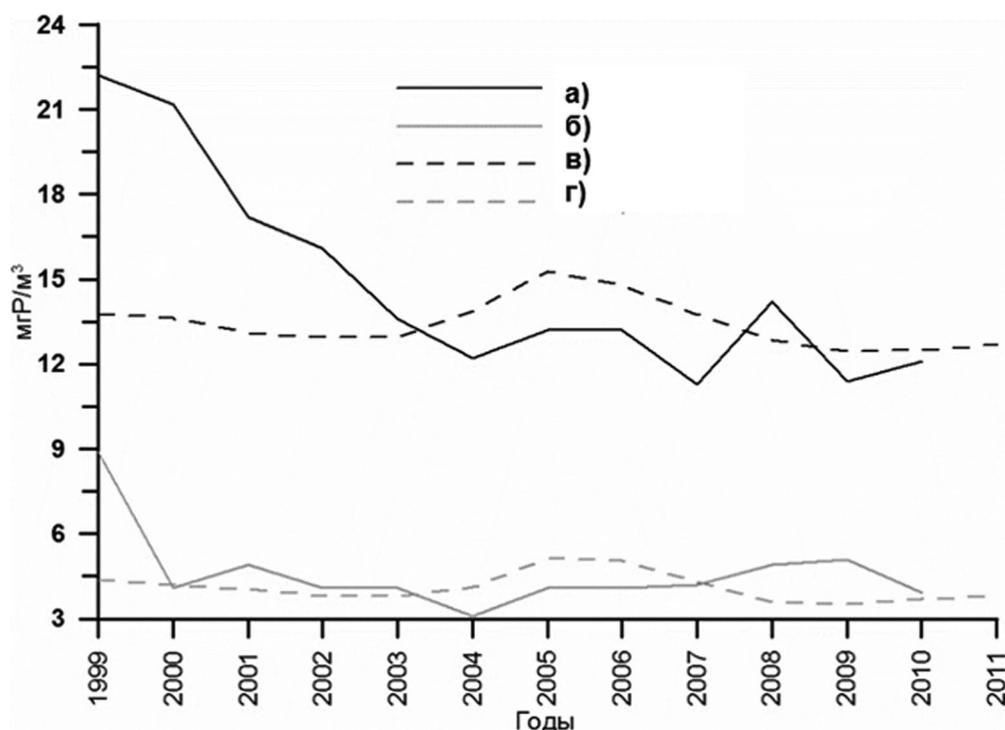


Рис. 4. Сравнение тенденций средних за период открытой воды концентраций общего фосфора (TP) и фосфатов (P-PO<sub>4</sub>), наблюдаемых (а, в) и рассчитанных на модели (б, г)

Fig. 4. Comparison of average open-water period concentrations of total phosphorous (TP) and phosphates (P-PO<sub>4</sub>), observed (a, в) and calculated as per the model (б, г)

ликованными данными, отражающими состояние Ладожского озера в современный период, позволяет сделать вывод, что предлагаемая модель может быть использована для исследования экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в экосистеме Ладожского озера в условиях изменения климата и антропогенного воздействия.

#### Сравнительный анализ современного состояния и будущих изменений экосистемы Ладожского озера

В соответствии с условиями проведения численных экспериментов внешняя нагрузка биогенными элементами на Ладожское озеро в будущем оставалась постоянной. Поэтому основным механизмом, влияющим на изменчивость компонентов экосистемы в будущем климате, является атмосферное воздействие.

Одним из основных гидрофизических параметров, влияющим на функционирование пресноводной экосистемы, является температура воды. Поэтому сначала выполним сравнительную оценку изменчивости температуры воды в современном и будущем климате. На рис. 5 представлена межгодовая изменчивость температуры в период с 1996 по 2040 годы.

Из рисунка 5 видно, что температура озера будет повышаться, вследствие повышения температуры воздуха. Однако, рассматривая различные периоды и области осреднения, можно отметить, что наиболее сильное повышение температур воды будет наблюдаться в вегетационный период (апрель–октябрь) в поверхностном слое воды. Сравнение среднегодовых значений температуры, осредненных за периоды 1996–2015 и 2021–2040 гг., показывает в будущем увеличение температуры в целом по озеру на 0,4 °С, а в поверхностном слое на 0,7 °С. При этом увеличение средней температуры в вегетационный период (апрель–октябрь) составит в целом для озера также 0,4 °С, а для поверхностного слоя 0,8 °С.

Одним из основных критериев, характеризующих трофическое состояние озера, является первичная продукция фитопланктона. На рис. 6 показана межгодовая изменчивость первичной продукции за период с 1996 по 2040 годы. Из рисунка видно, что в современный период с 1996 по 2015 год не наблюдается ярко выраженного тренда, несмотря на значительную межгодовую изменчивость. Этот результат хорошо согласуется с оценкой современного состояния фитопланктона Ладожского озера в современный период [Летанская, Протопопо-

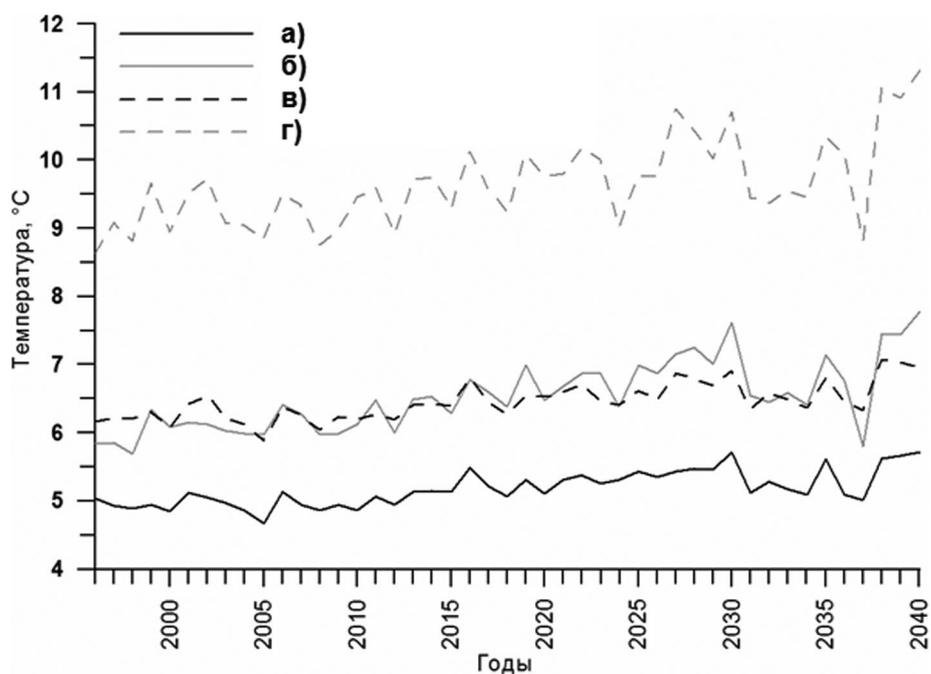


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осредненной температуры воды: а) среднегодовая по всей толще озера, б) среднегодовая по поверхности, в) средняя по всей толще озера за апрель–октябрь, г) средняя по поверхности за апрель–октябрь

Fig. 5. Interannual variability of averaged water temperature: а) average annual along the whole water column of the lake, б) average annual at the surface, в) average annual along the whole water column of the lake in April-October, г) average annual at the surface in April-October

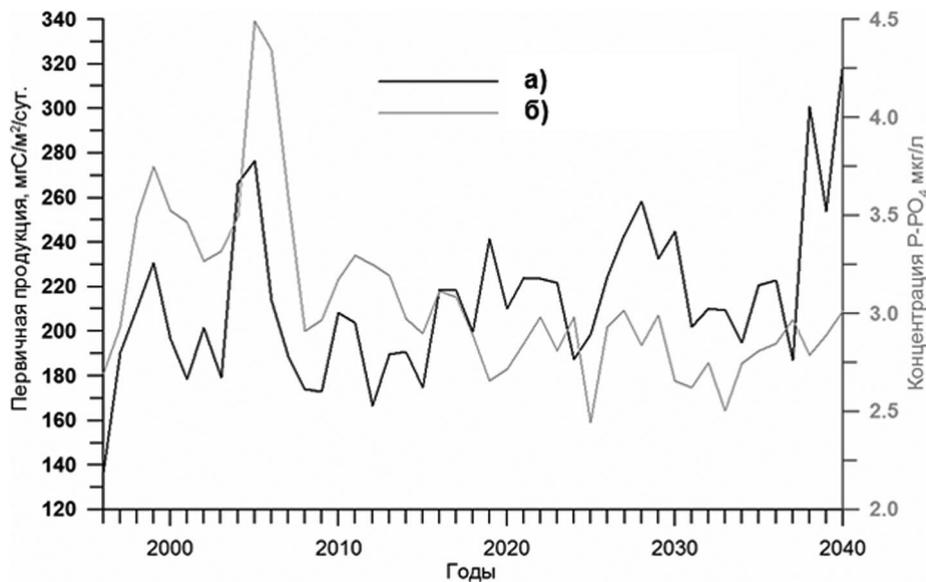


Рис. 6. Межгодовая изменчивость средней за вегетативный период первичной продукции (а) и концентрации фосфатов (б) по результатам моделирования

Fig. 6. Interannual variability of the average primary production during the vegetative period (а) and phosphates concentration (б) according to the modeling results

ва, 2012]. В указанной работе на основе данных натуральных наблюдений продемонстрировано, что структурно-функциональная организация фитопланктона Ладожского озера стабильна.

Особо отмечено, что не наблюдается трендов в биомассе фитопланктона.

Рассматривая изменчивость первичной продукции в будущем, можно отметить, что

Основные потоки фосфора, осредненные за современный период (1996–2015) и в будущем (2021–2040) по результатам моделирования

Main streams of phosphorous averaged for the modern period (1996–2015) and in future (2021–2040) according to the modeling results

	Среднее 1996–2015 Average	Среднее 2021–2040 Average	Изменения по отношению к современному периоду, % Changes relative to the modern period, %
Внешняя нагрузка, т в год External load, t/year	3093	2784	-10
Выход из донных отложений, т в год Release from bottom sediments, t/year	793	1020	29
Седиментация, т в год Sedimentation, t/year	2610	2534	-3
Вынос с р. Нева, т в год Export by the Neva, t/year	1238	1180	-5
Потребление, т в год Consumption, t/year	10046	11803	17
Минерализация, т в год Mineralization, t/year	3027	3304	9
Экскреция, т в год Excretion, t/year	3381	4897	45

начиная с 2020 года и до конца рассматриваемого периода наблюдается увеличение первичной продукции. Среднее за вегетативный период значение первичной продукции, осредненной за период 1996–2015 гг., составляет 197 мгС/м<sup>2</sup>/сут. В будущем (2021–2040 гг.) значение первичной продукции возрастет до значения 229 мгС/м<sup>2</sup>/сут. При этом необходимо отметить, что средняя концентрация минеральной формы фосфора в вегетативный период остается стабильной и не имеет трендов. Основной вклад в межгодовую изменчивость содержания фосфора вносит внешняя нагрузка. Поскольку эксперименты по воспроизведению экосистемы Ладожского озера в будущем климате проводились при постоянной внешней нагрузке, то следствием такой постановки задачи является постоянство концентрации фосфатов в водах озера.

Объяснение реакции экосистемы на климатические изменения можно найти, рассмотрев основные потоки фосфора. В таблице представлены осредненные на периоды 1996–2015 и 2021–2040 гг. потоки, формирующие баланс фосфора. Анализ таблицы показывает, что увеличение первичной продукции фитопланктона связано с увеличением потребления минерального фосфора, хотя его концентрация в будущем остается постоянной. Рассматривая биогеохимические потоки, влияющие на первичную продукцию, можно заметить, что в будущем наблюдается увеличение потоков, отвечающих за увеличение поступления минеральной формы фосфора в систему. А именно – минерализация органического вещества

и экскреция гетеротрофов увеличиваются на 9 и 45 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что увеличение первичной продукции является следствием усиления регенерации минерального фосфора как реакция системы на повышение температуры воды в фотическом слое в вегетационный период.

Наименьшие изменения в будущем претерпевают потоки седиментации и выноса фосфора со стоком реки Невы. Увеличение потока выхода из донных отложений также связано с увеличением температуры воды, поскольку выход из донных отложений зависит от скорости минерализации донных отложений, которая, в свою очередь, есть функция температуры.

## Выводы

Экспериментальные исследования показали, что за период 1951–2016 гг. при потеплении климата на водосборе озер с конца 80-х годов XX века наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев. При потеплении климата и значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют, рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения. Процесс трансформации гидрологического и химико-биологического режимов Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялись вклад внешних антропогенных и климатических

факторов, а также роль внутриводоемных процессов.

Для Ладожского озера создана модель, которая использована для исследования термогидродинамики, экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в озере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий. По результатам расчетов современного и будущего состояния экосистемы Ладожского озера можно сделать следующие выводы:

– В будущем климате до 2040 гг. прогнозируется увеличение температуры воды в целом по озеру на 0,4 °С, а в поверхностном слое – на 0,7 °С. При этом увеличение средней температуры в вегетативный период (апрель–октябрь) составит в целом для озера также 0,4 °С, а для поверхностного слоя 0,8 °С.

– Реакция экосистемы на повышение температуры воды будет выражаться в увеличении первичной продукции фитопланктона за счет усиления процесса регенерации минерального фосфора, при сохранении средних значений его концентрации на стабильном уровне. Учитывая условия проведения численных экспериментов, а именно то, что в будущем климате поступление биогенов с водосбора остается постоянным, выявленная реакция экосистемы Ладожского озера является реакцией исключительно на изменения климата, без учета возможных изменений антропогенных поступлений азота и фосфора в акваторию озера.

– Разработанная модель экосистемы Ладожского озера может быть положена на основу создания моделей экосистем других крупных стратифицированных озер, таких как Онежское, Байкал, Телецкое, а также для разработки систем поддержки принятия управленческих решений.

*Работа Н. Н. Филатова выполнена в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН), А. В. Исаева – в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (тема № 0149-2019-0015).*

*Авторы благодарят А. Ф. Балаганского за подготовку данных по водному балансу озер.*

## Литература

Владимирова О. М., Еремина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А., Савчук О. П. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 90–101.

Ершова А. А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточ-

ную часть Финского залива: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2013.

Игнатъева Н. В. Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе раздела вода-дно в Ладожском озере: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1997.

Ипатов С. В. Результаты мониторинга качества вод водных объектов системы Ладога – Невы – Невская губа // *Улучшение экологического состояния Невско-Ладожской водной системы – залог устойчивого развития Северо-Западного региона России: конф. (Санкт-Петербург, 25 апреля 2017 г.)*. СПб., 2017. 17 с.

Иофина И. В. Структура и функциональные характеристики водной микофлоры // *Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы* / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб.: Наука, 1992. С. 167–171.

Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Сабылина А. 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.

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013.

Летанская Г. И., Протопопова Е. В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // *Биология внутренних вод*. 2012. № 4. С. 17–24.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистемы пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. СПб.: Нестор-История, 2013. 120 с.

Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Иофина И. В., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Ладожское озеро: теория и практика. СПб.: Нестор-История, 2015. 76 с.

Назарова Л. Е. Влияние колебаний климата на сток с водосбора Онежского озера // *География и природные ресурсы*. 2010. № 1. С. 171–174.

Петрова Н. А., Иофина И. В., Капустина Л. Л., Кулиш Т. П., Петрова Т. Н., Расплетина Г. Ф. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975–2004 гг.) // *Экологическая химия*. 2005. Т. 14, № 4. С. 209–234.

Петрова Н. А., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Иофина И. В. Особенности эволюции большого стратифицированного озера гумидной зоны под влиянием антропогенного эвтрофирования (Ладожское озеро, 1975–2007) // *Водные ресурсы*. Т. 37, № 5. 2010. С. 580–589.

Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н. Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки // *ДАН. Сер. География*. Т. 434, № 5. 2010. С. 684–687.

Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // *Водные ресурсы*. 2011. Т. 38(6). С. 740–752.

Рябченко В. А., Карлин Л. Н., Исаев А. В., Ванкевич Р. Е., Еремина Т. Р., Молчанов М. С., Савчук О. П. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // *Океанология*. 2016. Т. 56(1). С. 41–50. doi: 10.7868/S0030157416010160

Синюкович В. Н., Чернышов М. С. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал // *Известия Иркутского гос. университета. Сер. Науки о Земле*. 2018. Т. 24. С. 99–110. doi: 10.26516/2073-3402.2018.24.99

Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. Л.: Наука, 1991. 191 с.

Филатов Н. Н., Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Литвиненко А. В., Лозовик П. А. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Bennington V., McKinley G. A., Kimura N., Wu Ch. H. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006 // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. c12015. doi: 10.1029/2010JC006261

Dorostkar A., Boegman L., Diamessis P., Pollard A. Sensitivity of MITgcm to different model parameters in application to Cayuga Lake // *Environmental Hydraulics – Proceed. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Environmental Hydraulics*. 2010. P. 373–378. doi: 10.1201/b10553-58

Döscher R., Willén U., Jones C., Tutgersson A., Meier H. E. M., Hansson U., Graham L. P. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCO // *Boreal Environ Res.* 2002. Vol. 7. P. 183–192.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming // *Limnol. and Freshwater Biol.* 2018. Vol. 1. P. 15–17. doi: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-15

Gaspar Ph., Grégoris Y., Lefevre J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term up-

per ocean study site // *J. Geophys. Res.* 1990. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson E., Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea // *Biogeochem.* 2017. Vol. 134. P. 301–317.

Isaev A. V., Eremina, T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *J. Mar. Syst.* 2017. Vol. 171. P. 81–88.

Jungclaus J. H., Botzet M., Haak H., Haak H., Luo J.-J., Latif M., Marotzke J., Mikolajewicz U., Roeckner E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5/MPI-OM // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 3952–3972.

Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach // *Aquatic Ecol.* 2010. Vol. 44(3). P. 633–667.

Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 3771–3791.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling*. Springer Praxis, 2010. 302 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.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.

Поступила в редакцию 27.02.2019

## References

Ershova A. A. Kompleksnaya otsenka postupleniya biogennykh veshchestv s vodosbora reki Neva v vostochnuyu chast' Finskogo zaliva [Complex assessment of biogenic matter supply from the Neva River catchment to the eastern part of the Gulf of Finland]: PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2013.

Filatov N. N. *Gidrodinamika ozer* [Hydrodynamics of lakes]. Leningrad: Nauka, 1991. 191 p.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada ETR: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lakes-reservoirs in the northwest of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p.

Ignat'eva N. V. Fosfor v donnykh otlozheniyakh i fosfornyi obmen na granitse razdela voda-dno v Ladozhskom ozere [Phosphorus in bottom sediments and phosphorus exchange at the water-bottom bounda-

ry in Lake Ladoga]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 1997.

Ipatova S. V. Rezul'taty monitoringa kachestva vodnykh ob'ektov sistemy Ladoga – Neva – Nevskaya guba [Results of water quality monitoring in the water bodies of the Ladoga-Neva-Neva Bay system]. *Uluchshenie ekol. sostoyaniya Nevsko-Ladzhskoi vodnoi sistemy – zalog ustoichivogo razvitiya Severo-Zapad. regiona Rossii: konf. (Sankt-Peterburg, 25 apr. 2017 g.)* [Improvement of ecol. condition of the Neva-Ladoga water system – the base for sustainable development of the northwestern region of Russia: conf. (St. Petersburg, April 25, 2017)]. St. Petersburg, 2017. 17 p.

Iofina I. V. *Struktura i funktsional'nye kharakteristiki vodnoi mikoflory* [Structure and functional characteristics of water mycoflora]. N. A. Petrova, A. Yu. Terzhevik (eds.). *Ladzhskoe ozero: kriterii sostoyaniya ekosistemy* [Lake Ladoga: criteria of the ecosystem state]. St. Petersburg: Nauka, 1992. P. 167–171.

Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Balaganskii A. F. *Mnogoletnyaya dinamika sto-*

ka 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.

Letanskaya G. I., Protopopova E. V. Sovremennoe sostoyanie fitoplanktona Ladozhskogo ozera (2005–2009 gg.) [Current state of the Lake Ladoga phytoplankton (2005–2009)]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2012. No. 4. P. 17–24.

Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya modelirovaniya ekosistemy presnovodnykh ozer. Ispol'zovanie modelei dlya resheniya zadach sokhraneniya ikh vodnykh resursov [State and prospects of development of freshwater lakes ecosystems modeling. Modeling for water resources protection]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. 120 p.

Menshutkin V. V., Petrova N. A., Iofina I. V., Petrova T. N., Susareva O. M. Ladozhskoe ozero: teoriya i praktika [Lake Ladoga: theory and practice]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015. 76 p.

Nazarova L. E. Vliyaniye kolebanii klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Influence of climate fluctuations on the runoff from the catchment of Lake Onego]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2010. No. 1. P. 171–174.

Petrova N. A., Iofina I. V., Kapustina L. L., Kulish T. P., Petrova T. N., Raspletina G. F. Antropogennoe evtrofirovaniye Ladozhskogo ozera (etapy transformatsii ekosistemy, 1975–2004 gg.) [Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga (stages of ecosystem transformation, 1975–2004)]. *Ekol. khim.* [Ecol. Chem.]. 2005. Vol. 14, no. 4. P. 209–234.

Petrova N. A., Petrova T. N., Susareva O. M., Iofina I. V. Osobennosti evolyutsii bol'shogo stratifitsirovanogo ozera gumidnoi zony pod vliyaniem antropogennogo evtrofirovaniya (Ladozhskoe ozero, 1975–2007) [Specific features of Lake Ladoga ecosystem under the effect of anthropogenic eutrophication (1975–2007)]. *Vod. resursy* [Water Resources]. Vol. 37, no. 5. 2010. P. 580–589.

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N. Modelirovaniye transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera pri snizhenii fosfornoj nagruzki [Modeling of the transformations of the Lake Ladoga ecosystem in response to a decrease in phosphorus load]. *DAN. Ser. Geografiya* [Proceed. RAS. Ser. Geography]. Vol. 434, no. 5. 2010. P. 684–687.

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Issledovaniye reaktsii ekosistemy Ladozhskogo ozera na snizheniye fosfornoj nagruzki [Studying the response of Lake Ladoga ecosystem to a decrease in phosphorus load]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 2011. Vol. 38(6). P. 740–752.

Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V., Vankevich R. E., Eremina T. R., Molchanov M. S., Savchuk O. P. Model'nye otsenki evtrofikatsii Baltiiskogo morya v sovremennom i budushchem klimate [Model assessment of the Baltic Sea eutrophication in current

and future climate]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2016. Vol. 56(1). P. 41–50. doi: 10.7868/S0030157416010160

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds). Ladoga [Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013.

Sinyukovich V. N., Chernyshov M. S. Sovremennyye problemy regulirovaniya urovnya ozera Baikal [Topical issues of water level regulation in Lake Baikal]. *Izv. Irkutskogo gos. univ. Ser. Nauki o Zemle* [The Bull. of Irkutsk St. Univ. Ser. Earth Sci.]. 2018. Vol. 24. P. 99–110. doi: 10.26516/2073–3402.2018.24.99

Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Modelirovaniye rastvorenno-go organicheskogo veshchestva v Finskoy zalive [Modeling of dissolved organic matter in the Gulf of Finland]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. and Appl. Hydrophysics]. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 90–101.

Bennington V., McKinley G. A., Kimura N., Wu Ch. H. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. c12015. doi: 10.1029/2010JC006261

Dorostkar A., Boegman L., Diamesis P., Pollard A. Sensitivity of MITgcm to different model parameters in application to Cayuga Lake. *Environmental Hydraulics – Proceed. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Environmental Hydraulics*. 2010. P. 373–378. doi: 10.1201/b10553-58

Döscher R., Willén U., Jones C., Tutgeresson A., Meier H. E. M., Hansson U., Graham L. P. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Environ Res.* 2002. Vol. 7. P. 183–192.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming. *Limnol. and Freshwater Biol.* 2018. Vol. 1. P. 15–17. doi: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-15

Gaspar Ph., Grégoris 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. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson E., Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea. *Biogeochem.* 2017. Vol. 134. P. 301–317.

Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *J. Mar. Syst.* 2017. Vol. 171. P. 81–88.

Jungclaus J. H., Botzet M., Haak H., Haak H., Luo J.-J., Latif M., Marotzke J., Mikolajewicz U., Roeckner E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate.* 2006. Vol. 19. P. 3952–3972.

Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach. *Aquatic Ecol.* 2010. Vol. 44(3). P. 633–667.

Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate.* 2006. Vol. 19. P. 3771–3791.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling. Springer Praxis, 2010. 302 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.

*Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.).* Contribution of Working Group I to the Fourth Assess-

ment. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.

Received February 27, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Филатов Николай Николаевич**

директор ИВПС КарНЦ РАН, главный научный сотрудник  
Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН,  
чл.-корр. РАН, советник 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

### **Исаев Алексей Владимирович**

старший научный сотрудник, к. г. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: isaev1975@gmail.com

### **Савчук Олег Павлович**

доцент, к. г. н.  
Институт наук о Земле Санкт-Петербургского  
государственного университета  
10-я линия В. О., 33–35, Санкт-Петербург, Россия, 199178  
Институт Балтик Нест, Центр Балтийского моря  
Стокгольмского университета  
Стокгольм, Швеция, SE-10691  
эл. почта: oleg.savchuk@su.se

## 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

### **Isaev, Aleksey**

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: isaev1975@gmail.com

### **Savchuk, Oleg**

Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University  
33–35 10<sup>th</sup> Line Vasilievsky Island, 199178 St.-Petersburg,  
Russia  
Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre  
Stockholm, Sweden, SE-10691  
e-mail: oleg.savchuk@su.se

УДК 51–76:574.583

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕСЕННЕЙ ДИНАМИКИ ПЛАНКТОНА НА ПРИМЕРЕ СЕЛЕНГИНСКОГО МЕЛКОВОДЬЯ ОЗ. БАЙКАЛ\*

**Б. О. Цыденов**

*Научно-исследовательская лаборатория вычислительной геофизики Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия*

Представлены результаты численного моделирования динамики фито- и зоопланктона в период развития весеннего термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал. На основе расчетов выявлено, что с повышением температуры воды в мелководье увеличивается концентрация фитопланктона, причем локальный максимум имеет смещение в сторону прибрежной части относительно фронта термобара. Моделирование показало, что нисходящие вдольсклоновые течения, возникающие в результате термобарической неустойчивости, способствуют распространению фитопланктона в глубоководную область водоема. Полученные в ходе вычислительных экспериментов распределения зоопланктона имеют направленный к берегу пространственный профиль монотонного роста, что связано с термическими условиями водной среды: чем выше температура воды, тем выше биомасса зоопланктона. Одним из важных результатов настоящей работы является оценка влияния ветра на пространственно-временную структуру концентрации планктона в условиях батиметрии Селенгинского мелководья озера Байкал. Математическое моделирование продемонстрировало, что индуцированные ветром течения приводят к перемешиванию и оседанию биомассы фитопланктона. Установлено, что ветры западного направления, дующие против движения термобара, имеют тенденцию замедлять горизонтальное распространение фито- и зоопланктона в центральную часть Байкала.

Ключевые слова: математическая модель; фитопланктон; зоопланктон; весенний термобар; гидробиология озера.

### **B. O. Tsydenov. NUMERICAL MODELING OF SPRING PLANKTON DYNAMICS IN THE SELENGA SHALLOW WATERS OF LAKE BAIKAL**

This paper presents the results of numerical modeling of plankton dynamics during the thermal bar event in the Selenga shallow-water area of Lake Baikal. It has been discovered that phytoplankton concentrations in the shallow waters increase with the temperature rise, and the local maximum is shifted shoreward relative to the thermal bar front. Simulations have shown that the downslope flows caused by thermobaric instability facilitate phytoplankton expansion to the deeper part of the lake. The zooplankton distributions simulated by numerical experiments had a spatially monotonic growth profile directed towards the shore. This is due to the temperature conditions of the water environment: the higher the water temperature, the higher the zooplankton biomass. An important find-

\* Редакционная коллегия серии считает, что статья является дискуссионной относительно авторского обобщения об азоте как лимитирующем факторе в пресноводных экосистемах.

ing of this work is an assessment of effect of wind on the space-time structure of plankton concentrations for the bottom topography of the Selenga shallow waters of Lake Baikal. Modeling has demonstrated that wind-induced currents lead to mixing and settlement of phytoplankton biomass. This study revealed that the westerly winds acting oppositely to the movement of the thermal bar tend to slow down the horizontal expansion of phytoplankton and zooplankton to the central part of Lake Baikal.

**Key words:** mathematical model; phytoplankton; zooplankton; spring thermal bar; lake hydrobiology.

## Введение

Высокий уровень биогенных элементов и усиление солнечной радиации весной обеспечивают благоприятные условия для роста планктонных сообществ в водных объектах умеренных широт [Ullman et al., 1998; Holland, Kay, 2003]. На весеннее развитие гидробиологических процессов в димиктических водоемах оказывают влияние гидрофизические механизмы [Moll et al., 1993], связанные с плотностным перемешиванием и образованием термобара – природного явления, представляющего собой погружение вод в окрестности температуры максимальной плотности.

Весенний термобар на Селенгинском мелководье озера Байкал возникает в начале мая и может существовать два месяца [Иванов, 2012]. Отмечается, что байкальский термобар имеет сильно выраженную зону конвергенции водных масс [Шимараев и др., 1995]. Ключевую роль в формировании термобара в Байкале [Likhoshway et al., 1996], а также в других крупных озерах [Ullman et al., 1998; Budd et al., 1999] играют речные притоки. Термобар на Селенгинском мелководье формируется под влиянием водного стока р. Селенги с более высокой температурой, особенностью рельефа дна, во время его существования происходит образование прибрежной полосы вод с высокой концентрацией биогенных веществ [Иванов, 2012].

Ветер играет важную роль в озерной гидродинамике в периоды развития термобара [Blokhtina, 2015; Tsydenov, 2018a]. В различных районах Байкала, в зависимости от особенностей ветрового режима и рельефа дна, вызванное ветром перемешивание достигает различной глубины [Верещагин, 1939]. В связи с этим большой интерес вызывает вопрос о совместном эффекте поверхностных течений, генерируемых ветром, и вертикальных движений водных масс, связанных с термобаром, на распределение фито- и зоопланктона в озере Байкал, особенно в мелководных участках, где ветровое трение является доминирующим фактором возникновения волн.

В пресноводных экосистемах фосфор традиционно рассматривается как основной лимитирующий элемент, однако эта концепция на основании ряда исследований недавно была оспорена в пользу азота [Верхозина и др., 2011; Rizhinashvili, Maksimova, 2018]. Азот, подобно фосфору, встречается в водоеме как в органической, так и в неорганической форме [Henderson-Sellers, 1984]. Процессы азотфиксации и денитрификации играют существенную роль в балансе азота экосистемы озера Байкал, хотя ранее предполагалось, что они незначительны [Верхозина и др., 2011]. Кроме того, известно, что в приустьевых участках притоков крупных водоемов первичная продукция лимитируется доступом света (например, из-за мутности воды или затенения прибрежной растительностью) и гидрофизическими условиями [Hilton et al., 2006; Larson et al., 2019]. Важно заметить, что конвективные процессы, возникающие в период развития термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал, приводят к тому, что взвешенные и растворенные вещества природного и антропогенного происхождения попадают в озеро в хорошо смешанном виде [Sherstyankin et al., 2007]. Натурные исследования показывают, что в весенний период распределение концентраций биогенных элементов в авандельте р. Селенги зависит от объемов их поступления с водным стоком, сроков возникновения термобара и скорости продвижения его фронта [Tomberg et al., 2014].

В настоящей работе в качестве лимитирующего элемента рассматривается азот, поскольку именно он является основным элементом, лимитирующим продуктивность органического вещества в пелагиали озера Байкал [Verkhozina et al., 2000; Верхозина, Верхозина, 2012].

Целью работы является численное воспроизведение динамики биомасс планктона и анализ ветровых эффектов на его пространственное распределение на месте впадения реки Селенги в озеро Байкал на основе модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» в период развития весеннего термобара.

## Материалы и методы

### Математическая модель

Численное моделирование динамики биомасс планктона в озере Байкал осуществлено посредством сопряжения термогидродинамического [Tsydenov et al., 2016] и биологического [Цыденов, 2017] модулей. Связи между компонентами биологической системы описываются моделью Паркера [Parker, 1991]. За перенос биомасс фито-, зоопланктона, биогенных элементов и детрита в математической модели ответственны конвективно-диффузионные уравнения вида

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Phyto]}{\partial t} + \frac{\partial u [Phyto]}{\partial x} + \frac{\partial w [Phyto]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Phyto]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Phyto]}{\partial z} \right) + \\ & + [Phyto] (G - m_{[Phyto]} - I [Zoo]) q; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Zoo]}{\partial t} + \frac{\partial u [Zoo]}{\partial x} + \frac{\partial w [Zoo]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Zoo]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Zoo]}{\partial z} \right) + \\ & + [Zoo] \left( (1 - Y_{[Nutr]} - Y_{[Detr]}) I [Phyto] - m_z \right) q; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Nutr]}{\partial t} + \frac{\partial u [Nutr]}{\partial x} + \frac{\partial w [Nutr]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Nutr]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Nutr]}{\partial z} \right) + \\ & + (-G [Phyto] - Y_{[Nutr]} I [Phyto] [Zoo] + C_0 [Detr]) q; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Detr]}{\partial t} + \frac{\partial u [Detr]}{\partial x} + \frac{\partial w [Detr]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Detr]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Detr]}{\partial z} \right) + \\ & + (m_{[Phyto]} [Phyto] + Y_{[Detr]} I [Phyto] [Zoo] - \\ & - C_0 [Detr] + m_{[Zoo]} [Zoo]) q, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $[Nutr]$ ,  $[Phyto]$ ,  $[Zoo]$  и  $[Detr]$  – концентрация биогенных элементов, фитопланктона, зоопланктона и детрита соответственно;  $D_x$  и  $D_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии в соответствующих направлениях.

В качестве биогенных элементов выбраны нитраты [Parker, 1991], поскольку экскреция зоопланктона, замыкая малый круговорот, сразу переходит в фонд нитратов. Кроме того, продукты деградации детрита также дополняют

фонд нитратов и растворенного органического азота [Jackson, Williams, 1985; Ward et al., 1989].

Скорость первичной продукции фитопланктона  $G$  определяется по формуле

$$G = V_m [(L_d/s_c) \exp\{1 - (L_d/s_c)\}] \{[Nutr]/([Nutr]+k_s)\}. \quad (5)$$

Свет, проникающий на глубину  $z = d$ , рассчитывается по экспоненциальной зависимости с учетом затенения планктоном и детритом в водной толще между поверхностью ( $z = L_z$ ) и глубиной:

$$L_d = L_0 \cdot par \cdot \exp \left\{ -\eta d - S_s \int_d^{L_z} ([Phyto] + [Zoo] + [Detr]) dz \right\}, \quad (6)$$

где  $L_0$  – приходящий на поверхность воды свет;  $par$  – доля света для фотосинтеза ( $=0,43$ ) [Fennel et al., 2006]. Параметру  $L_0$  в модели соответствует коротковолновая радиация [Fennel et al., 2006], которая вычисляется по формуле

$$H_{Ssol,0} = \begin{cases} S_0 \cdot (a_g - a_w) \cdot \cos \zeta [a(C) + b(C) \ln(\cos \zeta)], & \text{if } \cos \zeta > 0; \\ 0, & \text{if } \cos \zeta \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

здесь  $S_0 \approx 1367$  Вт/м<sup>2</sup> – солнечная постоянная,  $a(C)$  и  $b(C)$  – эмпирические коэффициенты [Aleksandrova et al., 2007], зависящие от степени покрытия небесного свода облачностью  $C$ ,  $\zeta$  – зенитный угол Солнца, эмпирические функции  $a_g$  и  $a_w$  представляют соответственно молекулярное рассеяние и поглощение излучения парами воды и оксидами углерода.

Смертность фитопланктона и множитель температурного ограничения вычисляются соответственно:

$$m_p = M \exp \{-(n_1 N)^2\}; \\ q = 2.5^{(T-15)/10}.$$

Остальные параметры, входящие в расчетные формулы модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» [Parker, 1991; Holland et al., 2003; Цыденов, 2017], приведены в таблице.

Начальная концентрация фито-, зоопланктона, биогенных элементов и детрита в модели принята равной 0,1; 0,1; 7,0 и 0,1 ммольN/м<sup>3</sup> соответственно (следует заметить, что размерность биологических компонентов указана в единицах азота, т. е. символ N обозначает химический элемент азот). Заданное в начальный момент времени вертикально неоднородное распределение

$$T_L(z) = -3 \times 10^{-6} |L_z - z|^2 + 4 \times 10^{-4} |L_z - z| + 3,02$$

Параметры модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит»

Parameters of a biogenic element-phytoplankton-zooplankton-detritus model

Параметр Parameter	Наименование Description	Значение Value
$V_m$	Максимальная скорость роста фитопланктона, сут <sup>-1</sup> Maximum phytoplankton growth rate, day <sup>-1</sup>	2,8
$\eta$	Коэффициент ослабления света, м <sup>-1</sup> Light extinction coefficient, m <sup>-1</sup>	0,15
$k_s$	Константа полунасыщения поглощения биогенных элементов, ммольN/м <sup>3</sup> Biogenic elements uptake half-saturation constant, mmolN/m <sup>3</sup>	0,6
$m_{[Zoo]}$	Смертность зоопланктона, сут <sup>-1</sup> Zooplankton death rate, day <sup>-1</sup>	0,1
$I$	Интенсивность питания зоопланктона, сут <sup>-1</sup> Ingestion rate of zooplankton, day <sup>-1</sup>	0,2
$M$	Максимальная скорость смертности фитопланктона, сут <sup>-1</sup> Maximum phytoplankton death rate, day <sup>-1</sup>	0,5
$n_1$	Коэффициент скорости смертности фитопланктона, (ммольN/м <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> Phytoplankton death rate coefficient, (mmolN/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	1
$Y_{[Nutr]}$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под биогенные элементы Unassimilated zooplankton grazing to biogenic elements	0,4
$Y_{[Detr]}$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под детрит Unassimilated zooplankton grazing to detritus	0,3
$C_0$	Скорость превращения детрита в биогенный элемент, сут <sup>-1</sup> Detritus to biogenic element conversion rate, day <sup>-1</sup>	0,02
$S_s$	Коэффициент самозатенения, (ммольN/м <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup> Self-shading coefficient, (mmolN/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	0,02
$S_c$	Коэффициент светового насыщения, Э м <sup>2</sup> сут <sup>-1</sup> Light saturation coefficient, E m <sup>2</sup> day <sup>-1</sup>	60

приближенно соответствует многолетним средним значениям температуры воды в южной котловине озера Байкал в июне [Shimaraev et al., 1994]. Температура воды речного притока равномерно повышается с 5 до 17 °С, что отражает реальный термический режим р. Селенги в моделируемый период [Иванов, 2012]. Минерализация воды в озере составляет 96 мг/кг, в реке линейно растет от 140 до 150 мг/кг. Скорость впадения р. Селенги в оз. Байкал принята равной 0,015 м/с [Иванов, 2012]. Компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены по расчетным формулам, приведенным в работе [Tsydenov, 2018b], на основе данных по температуре воздуха, относительной влажности, атмосферному давлению, облачности, скорости и направлению ветра из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкин в период с 1 по 30 мая 2015 г. Сдвиговое напряжение ветра на поверхности водоема описывается законом

$$\tau_{surf}^u = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot u_{10};$$

$$\tau_{surf}^v = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot v_{10};$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха у поверхности воды;  $c_{10} = 1,3 \times 10^{-3}$ ;  $u_{10}$  и  $v_{10}$  – составляющие скорости ветра на высоте 10 м.

Задача решается численно на основе метода конечного объема, согласно которому скалярные величины (температура, соленость, концентрация биологических компонентов, характеристики турбулентности и т. д.) определяются в центре сеточной ячейки, а составляющие вектора скорости – в средних точках на границах ячеек [Цыденов, 2013].

#### Морфометрия области исследования

Область исследования представляет собой поперечное сечение на границе южной и средней котловин озера Байкал: устье р. Селенги (протока Средняя) – Бугульдейка (рис. 1, а). Данные о рельефе дна, соответствующие указанному сечению, взяты из батиметрической электронной карты озера Байкал [Sherstyankin et al., 2006] (рис. 1, б). Селенгинское мелководье расположено в районе 51.9–52.5° с. ш. и 106.1–106.9° в. д., представляет собой отмель в виде мощного конуса, сформировавшуюся в результате аккумуляции наносов на придельтовом пространстве Байкала [Синюкович и др., 2004]. Его площадь (если считать по авандельте) составляет примерно 500 км<sup>2</sup> [Иванов, 2012]. Через разрывы цепи узких длинных кос селенгинские воды попадают в озеро Байкал [Синюкович и др., 2004].

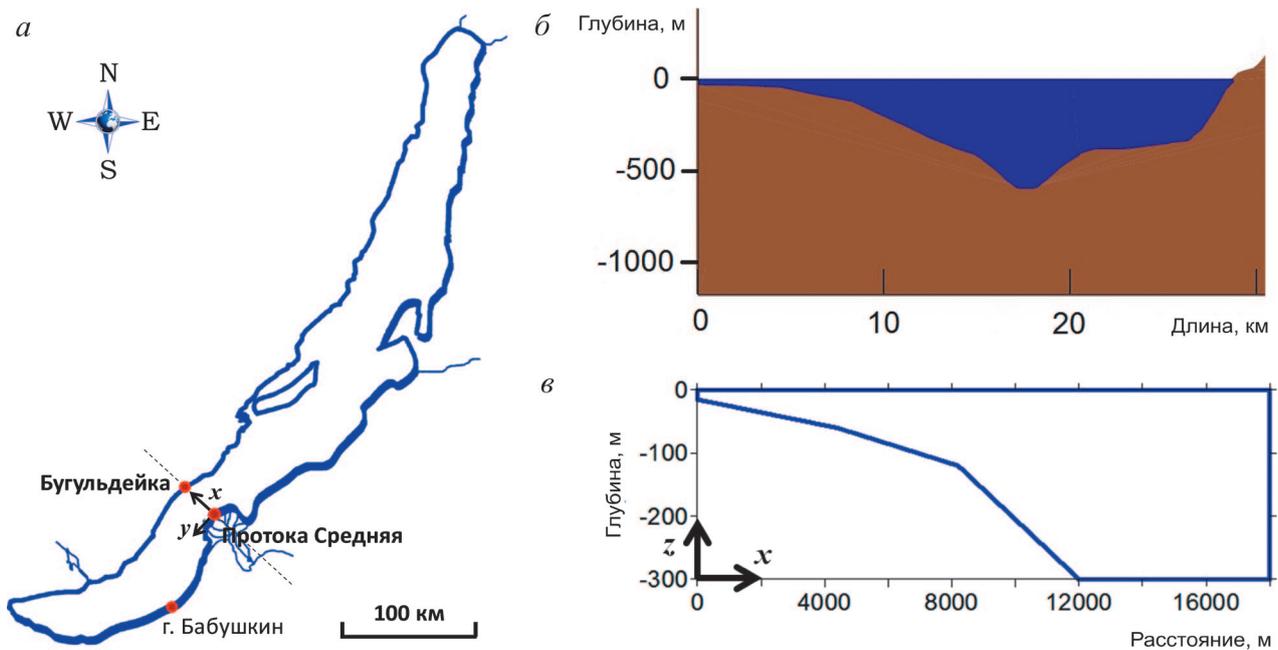


Рис. 1. Сечение протока Средняя – Бугульдейка: а – схема разреза оз. Байкал; б – рельеф дна для рассматриваемого разреза; в – геометрия расчетной области

Fig. 1. Srednyaya arm – Buguldeika cross-section: а – Lake Baikal cross-section scheme, б – bottom topography, в – calculation domain

Вычислительная область имеет протяженность 18 км и глубину 300 м (рис. 1, в). Глубина открытого участка речного стока (на левой границе) составляет 15 м. Расчетная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами  $h_x = 50$  м и  $h_z = 5$  м. Шаг по времени – 60 с.

## Результаты и обсуждение

Особенность развития гидродинамических процессов, связанных с эволюцией весеннего термобара на рассматриваемом разрезе протока Средняя – Бугульдейка в мае 2015 г., описана в [Tsydenov et al., 2018]. В настоящей работе будут представлены результаты, отражающие гидробиологический аспект моделирования.

Сведения о направлении ветра с 1 по 30 мая 2015 г. указывают на преобладание ветров западного направления. Ветры, дующие с севера, юга и востока, носят эпизодический характер. Максимальная скорость ветра 9 м/с наблюдалась на 23-й день. Условия, характеризующие ветровую обстановку в мае 2015 года, находятся в согласии с данными многолетних наблюдений в периоды свободного от льда озера. Подробный анализ соответствующих интервалу времени моделирования вариаций тепловых потоков, падающих на поверхность озера, приведен в [Tsydenov et al., 2018]. Среднемесячные значения потоков коротко- и длинноволновой

радиации, скрытого и чувствительного тепла составили 211,6; –43,8; –35,7 и 19,9 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Смоделированное без учета ветрового трения пространственное распределение фитопланктона на 12-й день показывает, что наибольшая концентрация фитопланктонных сообществ сосредоточена в поверхностном слое мелководья на расстоянии 4 км от устья реки (рис. 2, Phyto\_a1). На месте расположения термобара (6–6,5 км от устья р. Селенги), где происходит погружение вод, фитопланктон имеет вертикально однородное распределение (рис. 2, Phyto\_a1). Необходимо добавить, что в открытом участке озера благодаря прогреву поверхности воды за счет солнечной радиации также отмечается увеличение популяций фитопланктона, которые достигают глубины более 100 м (рис. 2, Phyto\_a1). По мере повышения температуры воды в мелководье наблюдается активный рост биомассы фитопланктона. На 17-й день концентрация фитопланктона увеличивается до 0,14 ммольN/м<sup>3</sup> (рис. 2, Phyto\_b1). Нисходящие вдольсклоновые течения, сгенерированные термобаром, способствуют распространению фитопланктона в глубоководную область озера.

Расчеты с учетом ветрового трения на границе раздела вода-воздух выявили влияние ветра на пространственное распределение планктона. Западные ветры, направленные проти-

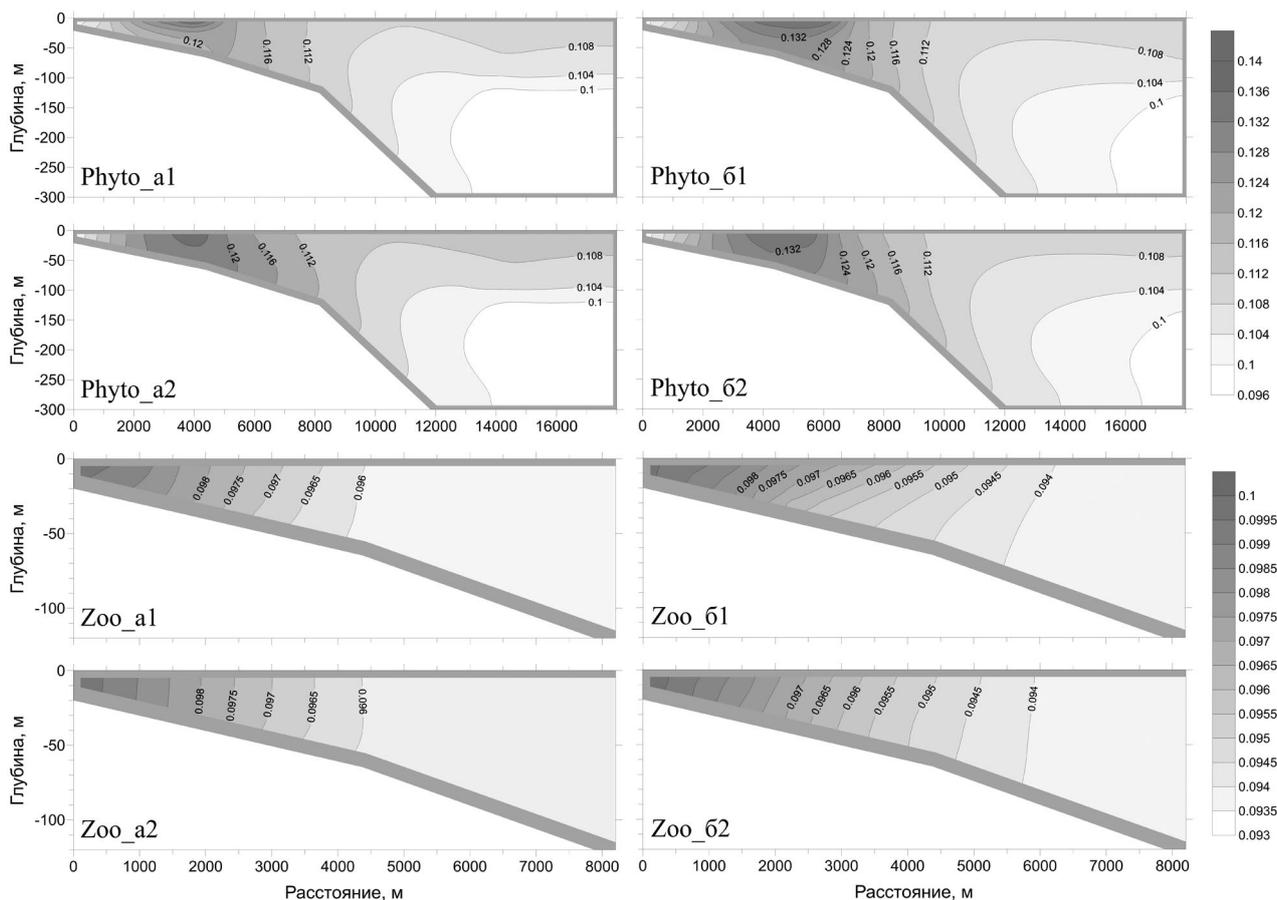


Рис. 2. Концентрация (ммольN/м<sup>3</sup>) фитопланктона (Phyto) и зоопланктона (Zoo) на 12-е (а) и 17-е (б) сутки моделирования при отсутствии (1) и наличии (2) ветра

Fig. 2. Concentration (mmolN/m<sup>3</sup>) of phytoplankton (Phyto) and zooplankton (Zoo) on the 12<sup>th</sup> (a) and 17<sup>th</sup> (b) days without wind stress (1) and with wind stress (2)

воположно перемещению термобара, замедляют его горизонтальное движение [Tsydenov et al., 2018]. Ветер способствует перемешиванию фитопланктонной биомассы в мелководье (рис. 2, Phyto\_a2, Phyto\_b2). Вследствие этого происходит оседание фитопланктона в нижние уровни. Максимальное значение концентрации фитопланктона (на 17-й день составляет 0,126 ммольN/м<sup>3</sup>) ниже, чем при безветренной погоде. Изолинии в зоне существования термобара (рис. 2, Phyto\_a2, Phyto\_b2) наклонены влево, заметна их корреляция со структурой изотерм (см. рис. 5, a2, b2 в [Tsydenov et al., 2018]).

Согласно результатам моделирования зоопланктон на Селенгинском мелководье оз. Байкал имеет отличное от фитопланктона распределение по пространственным координатам (рис. 2, Zoo). С увеличением расстояния от устья притока концентрация зоопланктона уменьшается. Это связано с термическими условиями водной среды: чем выше температура воды, тем выше биомасса зоопланктона. Аналогичная корреляция поля температуры с распре-

лением микробиологических сообществ на Селенгинском мелководье выявлена в ходе натурных наблюдений [Maksimenko et al., 2008].

Задержка эволюции термобара, связанная с воздействием ветра противоположного направления, является причиной замедления поверхностного распространения популяций зоопланктона в центральную часть озера (рис. 2, Zoo\_a2, Zoo\_b2). При наличии западных ветров изолинии концентрации зоопланктона, полученные на 12-й день моделирования, имеют строго вертикальную структуру в верхнем 30-метровом слое (рис. 2, Zoo\_a2).

Важно заметить, что весенний термобар в условиях Селенгинского мелководья озера Байкал действует как барьер, который препятствует горизонтальному распространению планктона в открытые воды. Локальный максимум концентрации фитопланктона смещен в сторону прибрежной части, а распределение зоопланктона имеет направленный к берегу пространственный профиль монотонного роста. В литературе встречаются примеры подобных типов распределения,

полученных в ходе натуральных наблюдений в периоды прогревания водоема [Scavia, Bennett, 1980; Moll et al., 1993; Holland, Kay, 2003]. Отборы проб воды в авандельте р. Селенги также показывают высокие концентрации биогенных элементов и взвешенных органических веществ в теплоактивной области (от устья реки до фронта термобара) и низкие концентрации в теплоинертной области (за фронтом термобара) [Тарасова, 1975; Tomberg et al., 2014].

## Заключение

Средствами математического моделирования воспроизведены гидробиологические процессы на примере Селенгинского мелководья озера Байкал в период развития весеннего термобара. Анализ полученных результатов выявил влияние температурного режима и гидрофизических условий, связанных с эволюцией термобара, на особенность распределения фито- и зоопланктона. Вычислительные эксперименты показали, что ветер, направленный против движения термобара, может выполнять барьерную функцию, замедляя перенос биомасс планктона в центральную часть водоема.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-60041 мол\_а\_дк).*

## Литература

Верещагин Г. Ю. О некоторых проблемах, связанных с изучением Байкала // Природа. 1939. № 12. С. 33–43.

Верхозина В. А., Верхозина Е. В. Биогеохимические процессы круговорота азота в экосистеме озера Байкал и их роль в процессах формирования качества воды // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всеросс. симп. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сент. 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 27–30.

Верхозина В. А., Верхозина Е. В., Чудненко К. В. Роль биогеохимических процессов в балансе азота экосистемы озера Байкал // Вода: химия и экология. 2011. Т. 12, № 42. С. 3–7.

Иванов В. Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2012. 24 с.

Синюкович В. Н., Жарикова Н. Г., Жариков В. Д. Сток реки Селенги в ее дельте // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 64–69.

Тарасова Е. Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 147 с.

Цыденов Б. О. Численное моделирование взаимодействия компонентов системы «нутри-

ент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» во время эволюции весеннего термобара // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 50. С. 112–121. doi: 10.17223/19988621/50/10

Цыденов Б. О. Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2013. 145 с.

Шимараев М. Н., Грачев М. А., Имбоден Д. М., Окуда С., Гранин Н. Г., Кипфер Р., Левин Л. А., Эндо Ш. Международный гидрофизический эксперимент на Байкале: процессы обновления глубинных вод в весенний период // ДАН. 1995. Т. 343, № 6. С. 824–827.

Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinitsyn A. V. An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic // Russ. Meteorology and Hydrology. 2007. Vol. 32, no. 4. P. 245–251. doi: 10.3103/S1068373907040048

Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. Vol. 70, no. 4. P. 319–325. doi: 10.3103/S0027134915040050

Budd J., Kerfoot W. C., Pilant A., Jipping L. M. The Keweenaw Current and ice rafting: Use of satellite imagery to investigate copper-rich particle dispersal // J. Great Lakes Res. 1999. Vol. 25, no. 4. P. 642–662. doi: 10.1016/S0380-1330(99)70768-9

Fennel K., Wilkin J., Levin J., Moisan J., O'Reilly J., Haidvogel D. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget // Global Biogeochem. Cycles. 2006. Vol. 20, no. 3. GB3007. doi: 10.1029/2005GB002456

Henderson-Sellers B. Engineering Limnology. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1984. 288 p.

Hilton J., O'Hare M., Bowes M. J., Jones J. I. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers // Sci. Total Environ. 2006. Vol. 365, no. 1–3. P. 66–83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.055

Holland P. R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // Limnologia. 2003. Vol. 33, no. 3. P. 153–162. doi: 10.1016/S0075-9511(03)80011-7

Holland P. R., Kay A., Botte V. Numerical modeling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // J. Mar. Syst. 2003. Vol. 43, no. 1–2. P. 61–81. doi: 10.1016/S0924-7963(03)00089-7

Jackson G. A., Williams P. M. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling // Deep Sea Res. 1985. Vol. 32, no. 2. P. 223–235. doi: 10.1016/0198-0149(85)90030-5

Larson J. H., Evans M. A., Fitzpatrick F. A., Frost P. C., Bailey S., Kennedy R., James W. F., Richardson W. B., Reneau P. C. Water column nutrient processing rates in rivermouths of Green Bay (Lake Michigan) // Biogeochemistry. 2019. Vol. 142, no. 1. P. 73–93. doi: 10.1007/s10533-018-0517-z

Likhoshway Y. V., Kuzmina A. Ye., Potyemkina T. G., Potyemkin V. L., Shimaraev M. N. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal // J. Great

Lakes Res. 1996. Vol. 22, no. 1. P. 5–14. doi: 10.1016/S0380-1330(96)70929-2

Maksimenko S. Y., Zemskaya T. I., Pavlova O. N., Ivanov V. G., Buryukhaev S. P. Microbial community of the water column of the Selenga River-Lake Baikal biogeochemical barrier // *Microbiology*. 2008. Vol. 77, no. 5. P. 587–594. doi: 10.1134/S0026261708050123

Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P. Physical, chemical, and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front // *Estuaries*. 1993. Vol. 16, no. 1. P. 92–103. doi: 10.2307/1352767

Parker R. A. Eddy diffusion of phytoplankton and nutrients: Estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions // *J. Plankt. Res.* 1991. Vol. 13, no. 4. P. 815–830. doi: 10.1093/plankt/13.4.815

Rizhinashvili A. L., Maksimova O. B. Is nitrate a driver for pigments of phytoplankton (a case study from a small shallow European lake)? // *Ann. Limnol. – Int. J. Limnol.* 2018. Vol. 54. P. 1–9. doi: 10.1051/limn/2018029

Scavia D., Bennett J. R. Spring transition period in Lake Ontario – a numerical study of the causes of the large biological and chemical gradients // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37, no. 5. P. 823–833. doi: 10.1139/f80-111

Sherstyankin P. P., Alekseev S. P., Abramov A. M., Stavrov K. G., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. Computer-based bathymetric map of Lake Baikal // *Dokl. Earth Sci.* 2006. Vol. 408, no. 4. P. 564–569. doi: 10.1134/S1028334X06040131

Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. Physical limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk: Okayama, 1994.

## References

Ivanov V. G. Formirovanie i evolyutsiya vesennego termobara za schet stoka reki (na primere Selenginskogo melkovod'ya ozera Baikal) [Formation and evolution of the spring thermal bar due to river runoff (Selenga shallow of Lake Baikal)]. Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Irkutsk, 2012. 24 p.

Shimaraev M. N., Grachev M. A., Imboden D. M., Okuda S., Granin N. G., Kipter R., Levin L. A., Endo S. Mezhdunarodnyi gidrofizicheskii eksperiment na Baikale: protsessy obnovleniya glubinnykh vod v vesennii period [International hydrophysical experiment in Lake Baikal: Spring deep water renewal]. *DAN [Dokl. Earth Sci.]*. 1995. Vol. 343, no. 6. P. 824–827.

Sinyukovich V. N., Zharikova N. G., Zharikov V. D. Stok reki Selengi v ee del'te [Selenga River runoff in its delta]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and natural resources]*. 2004. No. 3. P. 64–69.

Tarasova E. N. Organicheskoe veshchestvo vod Yuzhnogo Baikala [Organic matter in the waters of Southern Baikal]. Novosibirsk: Nauka, 1975. 147 p.

Tsydenov B. O. Chislennoe modelirovanie vzaimodeistviya komponentov sistemy «nutrient – fitoplankton – zooplankton – detrit» vo vremya evolyutsii vesennego termobara [Numerical modeling of the interaction between nutrient-phytoplankton-zooplankton-detritus system components during the spring thermal bar].

Tomberg I. V., Sorokovikova L. M., Popovskaya G. I., Bashenkhaeva N. V., Sinyukovich V. N., Ivanov V. G. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. Mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal) // *Water Resources*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 687–695. doi: 10.1134/S0097807814050157

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar // *J. Mar. Syst.* 2018a. Vol. 179. P. 1–9. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.004

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the effect of inflow water mineralization in the dynamics of the autumnal thermal bar in Kamloops Lake // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2018b. Vol. 73, no. 4. P. 435–440. doi: 10.3103/S0027134918040148

Tsydenov B. O., Kay A., Starchenko A. V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 104. P. 73–83. doi: 10.1016/j.ocemod.2016.05.009

Tsydenov B. O., Starchenko A. V., Kay A. The effects of wind and diurnal variability of surface heat fluxes on riverine thermal bar dynamics: a numerical experiment // *Inland Waters*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 322–328. doi: 10.1080/20442041.2018.1481667

Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes // *J. Great Lakes Res.* 1998. Vol. 24, no. 4. P. 753–775. doi: 10.1016/S0380-1330(98)70860-3

Ward B. B., Kilpatrick R. A., Renger E. H., Eppley R. W. Biological nitrogen cycling in the nitracline // *Limnol. Oceanogr.* 1989. Vol. 34, no. 3. P. 493–513. doi: 10.4319/lo.1989.34.3.0493

Поступила в редакцию 13.12.2018

*Vestnik Tomskogo gos. univ. Matematika i mekhanika [Tomsk St. Univ. J. Mathematics and Mechanics]*. 2017. No. 50. P. 112–121. doi: 10.17223/19988621/50/10

Tsydenov B. O. Chislennoe modelirovanie efekta vesennego termobara v glubokom ozere [Numerical modeling of the effect of the spring thermal bar in a deep lake]. PhD (Cand. of Phys.-Math.) thesis. Tomsk, 2013. 145 p.

Verkhozina V. A., Verkhozina E. V. Biogeokhimicheskie protsessy krugovorota azota v ekosisteme ozera Baikal i ikh rol' v protsessakh formirovaniya kachestva vody [Biogeochemical processes of nitrogen cycle in the ecosystem of Lake Baikal and their role in water quality formation]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Materialy V Vseross. simp. s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sent. 2012 g.) [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and sea waters: Proceed. V All-Russ. symp. with int. part. (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012)]*. Petrozavodsk, 2012. P. 27–30.

Verkhozina V. A., Verkhozina E. V., Chudnenko K. V. Rol' biogeokhimicheskikh protsessov v balanse azota ekosistemy ozera Baikal [Biogeochemical processes role in nitrogen balance of Lake Baikal ecosystem]. *Voda: khimiya i ekol. [Water: Chemistry and Ecol.]*. 2011. Vol. 12, no. 42. P. 3–7.

- Vereshchagin G. Yu. O nekotorykh problemakh, svyazannykh s izucheniem Baikala [On some problems associated with the study of Baikal]. *Priroda* [Nature]. 1939. No. 12. P. 33–43.
- Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinitsyn A. V. An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic. *Russ. Meteorology and Hydrology*. 2007. Vol. 32, no. 4. P. 245–251. doi: 10.3103/S1068373907040048
- Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting. *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2015. Vol. 70, no. 4. P. 319–325. doi: 10.3103/S0027134915040050
- Budd J., Kerfoot W. C., Pilant A., Jipping L. M. The Keweenaw Current and ice rafting: Use of satellite imagery to investigate copper-rich particle dispersal. *J. Great Lakes Res.* 1999. Vol. 25, no. 4. P. 642–662. doi: 10.1016/S0380-1330(99)70768-9
- Fennel K., Wilkin J., Levin J., Moisan J., O'Reilly J., Haidvogel D. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochem. Cycles*. 2006. Vol. 20, no. 3. GB3007. doi: 10.1029/2005GB002456
- Henderson-Sellers B. *Engineering Limnology*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1984. 288 p.
- Hilton J., O'Hare M., Bowes M. J., Jones J. I. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Sci. Total Environ.* 2006. Vol. 365, no. 1–3. P. 66–83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.055
- Holland P. R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation. *Limnologia*. 2003. Vol. 33, no. 3. P. 153–162. doi: 10.1016/S0075-9511(03)80011-7
- Holland P. R., Kay A., Botte V. Numerical modeling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake. *J. Mar. Syst.* 2003. Vol. 43, no. 1–2. P. 61–81. doi: 10.1016/S0924-7963(03)00089-7
- Jackson G. A., Williams P. M. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling. *Deep Sea Res.* 1985. Vol. 32, no. 2. P. 223–235. doi: 10.1016/0198-0149(85)90030-5
- Larson J. H., Evans M. A., Fitzpatrick F. A., Frost P. C., Bailey S., Kennedy R., James W. F., Richardson W. B., Reneau P. C. Water column nutrient processing rates in rivermouths of Green Bay (Lake Michigan). *Biogeochemistry*. 2019. Vol. 142, no. 1. P. 73–93. doi: 10.1007/s10533-018-0517-z
- Likhoshway Y. V., Kuzmina A. Ye., Potyemkina T. G., Potyemkin V. L., Shimaraev M. N. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.* 1996. Vol. 22, no. 1. P. 5–14. doi: 10.1016/S0380-1330(96)70929-2
- Maksimenko S. Y., Zemskaya T. I., Pavlova O. N., Ivanov V. G., Buryukhaev S. P. Microbial community of the water column of the Selenga River-Lake Baikal biogeochemical barrier. *Microbiology*. 2008. Vol. 77, no. 5. P. 587–594. doi: 10.1134/S0026261708050123
- Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P. Physical, chemical, and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front. *Estuaries*. 1993. Vol. 16, no. 1. P. 92–103. doi: 10.2307/1352767
- Parker R. A. Eddy diffusion of phytoplankton and nutrients: Estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions. *J. Plankt. Res.* 1991. Vol. 13, no. 4. P. 815–830. doi: 10.1093/plankt/13.4.815
- Rizhinashvili A. L., Maksimova O. B. Is nitrate a driver for pigments of phytoplankton (a case study from a small shallow European lake)? *Ann. Limnol. – Int. J. Lim.* 2018. Vol. 54. P. 1–9. doi: 10.1051/limn/2018029
- Scavia D., Bennett J. R. Spring transition period in Lake Ontario – a numerical study of the causes of the large biological and chemical gradients. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37, no. 5. P. 823–833. doi: 10.1139/f80-111
- Sherstyankin P. P., Alekseev S. P., Abramov A. M., Stavrov K. G., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. Computer-based bathymetric map of Lake Baikal. *Dokl. Earth Sci.* 2006. Vol. 408, no. 4. P. 564–569. doi: 10.1134/S1028334X06040131
- Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. *Physical limnology of Lake Baikal: a Review*. Irkutsk: Okayama, 1994.
- Tomberg I. V., Sorokovikova L. M., Popovskaya G. I., Bashenkhayeva N. V., Sinyukovich V. N., Ivanov V. G. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. Mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal). *Water Resources*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 687–695. doi: 10.1134/S0097807814050157
- Tsydenov B. O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar. *J. Mar. Syst.* 2018. Vol. 179. P. 1–9. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.004
- Tsydenov B. O. Numerical modeling of the effect of inflow water mineralization in the dynamics of the autumnal thermal bar in Kamloops Lake. *Moscow Univ. Phys. Bull.* Vol. 73, no. 4. P. 435–440. doi: 10.3103/S0027134918040148
- Tsydenov B. O., Kay A., Starchenko A. V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake. *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 104. P. 73–83. doi: 10.1016/j.ocemod.2016.05.009
- Tsydenov B. O., Starchenko A. V., Kay A. The effects of wind and diurnal variability of surface heat fluxes on riverine thermal bar dynamics: a numerical experiment. *Inland Waters*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 322–328. doi: 10.1080/20442041.2018.1481667
- Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes. *J. Great Lakes Res.* 1998. Vol. 24, no. 4. P. 753–775. doi: 10.1016/S0380-1330(98)70860-3
- Ward B. B., Kilpatrick R. A., Renger E. H., Eppley R. W. Biological nitrogen cycling in the nitracline. *Limnol. Oceanogr.* 1989. Vol. 34, no. 3. P. 493–513. doi: 10.4319/lo.1989.34.3.0493

Received December 13, 2018

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:****Цыденов Баир Олегович**

старший научный сотрудник научно-исследовательской  
лаборатории вычислительной геофизики, к. ф.-м. н.  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36, Томск, Россия, 634050  
эл. почта: [tsydenov@math.tsu.ru](mailto:tsydenov@math.tsu.ru)  
тел.: (3822) 783593

**CONTRIBUTOR:****Tsydenov, Bair**

Tomsk State University  
36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russia  
e-mail: [tsydenov@math.tsu.ru](mailto:tsydenov@math.tsu.ru)  
tel.: (3822) 783593

## ХРОНИКА

### ИТОГИ УЧАСТИЯ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ В КОНФЕРЕНЦИИ «ОЗЕРА 2018: СОХРАНЕНИЕ И УСТОЙЧИВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЧНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ» (Мудбидри, Индия, 22–25 ноября 2018 г.)

22–25 ноября 2018 года в рамках сотрудничества Индии и России в изучении водных ресурсов представители трех российских академических институтов к. г. н. В. О. Полянин (ИВП РАН), к. б. н. Н. А. Белкина (ИВПС КарНЦ РАН) и к. х. н. И. В. Рудский (ИНОЗ РАН) приняли участие в 11-й научно-практической конференции «Озера 2018» (Lake 2018: Conference on Conservation and Sustainable Management of Riverine Ecosystems), которая состоялась в городе Мудбидри (Moodbidri) индийского штата Карнатака. Основными организаторами этого визита выступили Президент фонда окружающей среды проф. Им. Р. Мюрти, Институт науки Индии (Indian Institute of Science) и образовательный фонд Альвы (Alva's Educa-

tion Foundation) при поддержке Министерства экологии, лесов и изменения климата, а также Министерства науки и технологии правительства Индии. Командировка российских специалистов проходила в рамках Меморандума о взаимопонимании, которым установлены общие принципы совместной работы и академического сотрудничества в сфере комплексного управления водными ресурсами. Данный документ был подписан в конце февраля 2018 г. с учетом положений «Комплексной программы сотрудничества в области науки, техники и инноваций между правительствами РФ и Индии» и «Соглашения о научном сотрудничестве и обмене учеными между Российской и Индийской академиями наук».



Главной темой конференции «Lake 2018» было сохранение речных и озерных экосистем и устойчивое управление водными ресурсами. В ходе выступлений большое внимание уделялось вопросам охраны окружающей среды, организации водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, предотвращения загрязнения водных объектов, а также деградации природных комплексов Западных Гат – горной системы на западе полуострова Индостан, 60 % которой расположено в пределах штата Карнатака. Следует отметить, что Западные Гаты характеризуются высоким разнообразием представителей растительного и животного мира, многие из которых являются эндемиками. Однако, как было отмечено во многих докладах и последующих дискуссиях, экосистема этих гор испытывает сильнейший антропогенный стресс, остро проявляющийся на фоне изменений климата.

Опытом организации системы водоснабжения г. Москвы, мониторинга природных вод и подходов к выявлению источников сосредоточенного и диффузного загрязнения поделился заместитель директора Института водных проблем РАН Владислав Полянин. Результаты исследований донных отложений, их состава и роли в процессах функционирования водных экосистем представила и. о. руководителя лаборатории палеолимнологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Наталья Белкина. Научный сотрудник лаборатории гидрохимии Института озероведения РАН Иван Рудский познакомил индийскую аудиторию с экспериментальными подходами к управлению цветением природных и искусственных водоемов.

В рамках стендовой сессии 23 ноября были заслушаны доклады студентов и школьников, посвященные водно-экологической тематике родного края, вопросам использования лекарственных растений, экономии воды, предотвращения загрязнения местных водоемов, биоразнообразию и санитарному состоянию территорий, пищевой безопасности. Российским специалистам была предоставлена почетная возможность оценить доклады ребят и принять участие в церемонии награждения победителей. Выбор лучших являлся непростой задачей, поскольку практически все доклады были прекрасно подготовлены и представлены с большими энтузиазмом и неподдельной заинтересованностью всех участников.

25 ноября на конференции проводился конкурс студенческих исследовательских работ, направленных на изучение, мониторинг и решение вопросов в области фаунистики, экологии водных и лесных сообществ, в области природоохранной деятельности, а также в об-

ласти проектирования энергетической инфраструктуры, сохраняющей природное разнообразие. Работы оценивались российско-индийским жюри в отношении научного содержания, графической презентации и устного доклада. Были заслушаны доклады по 9 проектам, каждый из них вызвал интерес российских и индийских специалистов: звучала конструктивная критика, пояснения, были даны рекомендации по развитию и представлению самостоятельных научных работ. Две работы жюри конкурса признало победителями.

В целом конференция носила научно-прикладной и просветительский характер и представляла собой своеобразную площадку открытого общения между молодым и старшим поколением ученых и исследователей. Предложенный формат создает хорошие условия для передачи знаний, стимулирует здоровую конкуренцию среди участников, обеспечивает вовлеченность студентов и школьников в решение актуальных экологических проблем, с которыми сталкивается общество.

После конференции «Озера 2018» участники посетили Институт технологий и науки Керуныя в г. Коимбаторе (Coimbatore) – крупном образовательном и научно-исследовательском центре в области инженерии, биотехнологий, пищевого и сельскохозяйственного производства, где 27–28 ноября также приняли участие в двухдневной конференции. Город представляет собой центр текстильной промышленности индийского штата Тамил Наду. Одной из основных частей программы стали российско-индийские консультации по вопросам благополучия населения, исследования и охраны водных ресурсов. Их целью являлся обмен опытом, поиск контактов и взаимовыгодных направлений сотрудничества. Российская сторона ознакомила индийских коллег с направлениями деятельности своих институтов. В ходе рабочей сессии была достигнута предварительная договоренность о подготовке конкретных предложений по направлениям и объектам совместной работы. Индийские коллеги проявили интерес к сотрудничеству с Россией в области управления водными ресурсами, формирования качества подземных и поверхностных вод, водоснабжения городов, а также по проблеме восстановления водных объектов. Последнее из перечисленных направлений представляется одним из наиболее перспективных. В частности, отмечалось, что восстановление деградирующих водных объектов возможно на основе мультидисциплинарного подхода. Российские и индийские институты имеют в своем составе лаборатории и вы-

сококвалифицированных специалистов разных научных направлений, объединенные усилия которых позволяют решать такого рода задачи. Объектами исследования могли бы стать небольшие, близкие по размерам и характеру антропогенного воздействия водные объекты, например, малые реки, озера и водохранилища на территории Индии и России. Это лишь одно из предложений, которые было бы уместно рассмотреть на очередной встрече во время запланированного ответного визита индийских ученых в Россию летом 2019 г.

В заключение хотим выразить благодарность президенту фонда исследований окружающей среды (Бангалор, штат Карнатака) д-ру Раджасекару Мюрти за общую организацию поездки и координацию взаимодействия с ин-

дийскими специалистами, координатору исследовательской группы в сфере энергии и заболоченных территорий Центра экологических наук Института науки Индии д-ру Т. В. Рамачандре и г-ну В. М. Альве (Образовательный фонд Альвы) за высокий уровень организации мероприятий и интересную работу конференции, вице-ректору Института технологии и науки (Karunya Institute of Technology and Sciences) д-ру П. М. Джавахару, про-вице-ректору Института технологии и науки (Karunya Institute of Technology and Sciences) д-ру Е. Дж. Джеймсу и их коллегам за теплый прием, энтузиазм и конструктивные переговоры.

*В. О. Полянин, к. г. н.,  
Институт водных проблем РАН*

### **A résumé of Russian participation in the conference “Lakes 2018: Conservation and Sustainable Management of Riverine Ecosystems” (Moodbidri, India, November 22–25, 2018) in the framework of cooperation between Russia and India on water issues**

Representatives of three Russian academic institutes (Dr. V. Polyanin (Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow); Dr. N. Belkina (Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk) and Dr. I. Rudsky (Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences)) participated in the 11<sup>th</sup> biennial conference “Lake 2018: Conference on Conservation and Sustainable Management of Riverine Ecosystems” (November 22–25, 2018), which was held in the town of Moodbidri of the Indian state of Karnataka. The main organizers of the event were Dr. Rajasekar Murty, President of the Environmental Research Foundation (Bangalore, Karnataka) Indian Institute of Science and Alva’s Education Foundation with the support of the Ministry of Ecology, Forests and Climate Change and the Ministry of Science and Technology of the Government of India.

The Russian specialists’ involvement was in the framework of the Memorandum of Understanding establishing the general principles of the joint work and academic cooperation in the field of integrated water resources management. This document was signed in the end of February 2018, in line with the provisions of the Integrated Long-term Programme of Cooperation in Science, Technology and Innovation between the Governments of Russia and India and the Agreement on Scientific Cooperation and Exchange of Scientists between the Russian and the Indian Academies of Sciences.

The main topic of the conference “Lake 2018” was the conservation of river and lake ecosystems and sustainable water management. Most

presentations were devoted to environmental protection issues, water supply and waste water disposal in inhabited localities, prevention of pollution of water bodies, as well as degradation of natural complexes of the Western Ghats – a mountain system in the West of the Hindustan Peninsula, 60 % of which is located within the state of Karnataka. The Western Ghats feature a great diversity of the flora and fauna, with many endemic species. However, as has been mentioned in many of the presentations and subsequent discussions, the ecosystem of these mountains is under severe anthropogenic stress, which is acutely manifest in the context of climate change.

The experience of water supply arrangements in Moscow, monitoring of natural waters and approaches to the identification of point and non-point sources of pollution was shared by the Deputy Director of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences Vladislav Polyanin. The results of research on bottom sediments, their composition and role in the functioning of aquatic ecosystems were presented by Natalia Belkina, Head of the Paleolimnology Laboratory at the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences. Ivan Rudsky, Research Scientist from the Hydrochemistry Laboratory at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, familiarized the Indian audience with experimental approaches to managing algal blooms in natural and artificial water reservoirs.

On November 23<sup>rd</sup>, students and schoolchildren presented their posters on issues related to the water environment of their native land,

the use of medicinal plants, water saving, prevention of pollution of local water bodies, biodiversity and sanitary state of territories, food safety. Russian specialists were honored with the opportunity to evaluate the children's presentations and take part in the award ceremony. Choosing the best ones was not easy, given that virtually all the posters were well-prepared and presented with great enthusiasm and genuine interest.

The conference agenda on November 25<sup>th</sup> included a competition of student research papers dealing with the study, monitoring and handling of issues in the field of fauna research, ecology of aquatic and forest communities, nature protection, as well as the design of the energy infrastructure to preserve the natural diversity. The papers were evaluated by an Indo-Russian jury for scientific

content, graphic presentation and oral presentation. Nine projects were presented, each of them arousing interest in Russian and Indian experts: there was constructive criticism, explanations, recommendations on how to develop and present students' own scientific work. The Jury recognized two of the works as the winners.

In general, the conference was of applied-science and educational nature, and served as a platform for open communication between the young and the older generations of scientists and researchers. This format creates good conditions for knowledge transfer, stimulates healthy competition among participants, and facilitates the involvement of students and schoolchildren in dealing with pressing environmental issues faced by the society.

### **Karunya Institute of Technology and Sciences: Indo-Russian International Consultations**

On November 27–28, 2018 the business trip to India continued for the Russian delegation with a two-day conference in Coimbatore – the center of the textile industry of the Indian state of Tamil Nadu. One of the main events on the agenda was the Indo-Russian consultations on issues of public well-being, water research and protection. The consultations were held at the Karunya Institute of Technology and Sciences – a large center for education and research in engineering, biotechnologies, food and agricultural production. Their goal was to exchange experience, search for contacts and mutually beneficial areas of cooperation. Russian participants briefed their Indian colleagues on the activities of their institutions. During the working session, a preliminary agreement was reached that specific proposals will be prepared on areas and objects for joint work. Indian colleagues showed interest in cooperating with Russia on water resources management, ground and surface water quality formation, urban water supply, as well as on the problem of waterbodies restoration. The latter appears to hold the greatest promise. It was mentioned, that restoration of degrading waterbodies is possible on the basis of a multidisciplinary approach. Russian and Indian institutes have laboratories and highly qualified specialists in various scientific fields, whose

joint efforts can help solve problems of this sort. Joint studies could focus on small waterbodies similar in size and exposure to human impact, such as small rivers, lakes and reservoirs in India and Russia. This is just one of the proposals that can be recommended for consideration at the next meeting during the return visit of Indian scientists to Russia scheduled for the summer of 2019.

We'd like to express our gratitude to Dr. Rajasekar Murti, President of the Environmental Research Foundation (Bangalore, Karnataka) for the overall organization of the trip and coordination of interactions with Indian specialists, to Dr. T. V. Ramachandra, coordinator of the energy and wetlands research group at the Indian Institute of Science Center for Ecological Sciences, and Mr. V. M. Alva (Alva's Educational Foundation) for the superb organization of events and interesting work of the conference, to Vice-rector of the Karunya Institute of Technology and Sciences Dr. P. M. Jawahar, Pro-Vice-Rector of the Karunya Institute of Technology and Sciences Dr. E. G. James and to their colleagues for the warm welcome, enthusiasm and constructive talks.

*V. O. Polyinin,  
Water Problems Institute of RAS*

## **КОНФЕРЕНЦИЯ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ: НАУЧНЫЕ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ» (Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2018 г.)**

19–20 декабря минувшего года в Санкт-Петербурге состоялась II Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». Организаторами конференции выступили: Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Северо-Западное Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Государственный гидрологический институт, при финансовой под-

держке Российского фонда фундаментальных исследований.

Цель мероприятия – представить наиболее интересные результаты работы и определить основные задачи в развитии науки и образования в области гидрометеорологии. В рамках конференции были рассмотрены вопросы формирования климата Земли, предсказуемости гидрометеорологических процессов, принципы создания новых технических средств и методов наблюдений за окружающей средой, изучения механизмов формирования изменчивости полей физических, химических и биологических характеристик атмосферы, гидро-



сферы и криосферы на различных масштабах, изменений природных систем под влиянием антропогенных факторов.

В рамках конференции проходили пленарная и девять тематических секций, постоянно работала демонстрационная площадка, на которой было представлено оборудование для мониторинга окружающей среды, кроме того, совместно с Институтом повышения квалификации руководящих работников и специалистов Росгидромета была проведена школа-семинар.

На конференции собрались аспиранты, инженеры, специалисты, научные сотрудники и руководители из образовательных учреждений, научно-исследовательских институтов, специализированных государственных и коммерческих организаций. В работе конференции принимали участие около 250 человек из Санкт-Петербурга, Москвы, Великого Новгорода, Владивостока, Казани, Калининграда, Мурманска, Нижнего Новгорода, Новосибирска, Обнинска, Пензы, Перми, Петрозаводска, Ростова-на-Дону, Севастополя, Тольятти, Томска, Челябинска, Южно-Сахалинска, Якутска.

Они представляли 32 организации, занимающиеся вопросами гидрометеорологии и экологии. Почти четверть докладчиков являлись или молодыми учеными, или студентами.

Обсуждения и дискуссии в рамках работы секций показали, что технические возможности проведения исследований, анализа их результатов, а также кадровый потенциал в России требуют интенсивного развития, в особенности принимая во внимание высокий общемировой уровень, постоянное расширение рынка новых приборов и методов моделирования и прогнозирования гидрометеорологических и экологических процессов в условиях изменяющегося климата Земли и увеличения антропогенной нагрузки. Комплексная направленность мероприятия и наличие большого числа разнообразных секций позволили специалистам существенно расширить кругозор, провести обсуждение и планирование возможных междисциплинарных исследований и поделиться своим опытом исследований.

*А. В. Зимин, д. г. н.,  
Институт океанологии РАН*

## УТРАТЫ

### ЗАЛМАН САМУИЛОВИЧ КАУФМАН (1921–2019)



10 февраля 2019 г. на 99-м году ушел из жизни Залман Самуилович Кауфман – замечательный человек, крупный ученый, всю жизнь посвятивший изучению биоты морских и пресных вод.

Залман Самуилович Кауфман родился в г. Чернигове 10 января 1921 г. В раннем детстве проявил большую любовь к природе. Окончив украинскую школу и выдержав труднейшие вступительные экзамены, он поступил на биологический факультет Ленинградского

государственного университета. Однако учиться не пришлось. Началась война с Финляндией, и Залман Самуилович был призван в армию. Проходил службу в 1-й Московской пролетарской дивизии. В 1941 г. после майского парада на Красной площади дивизия была отправлена в Западную Белоруссию, на советско-германскую границу, где их и застала война. Он испытал все «прелести» войны: отступление, наступление, форсировал Днепр летом и Волхов зимой, был разведчиком, не раз ходил за «языком». Залман Самуилович был ранен и после выписки отправлен на Балтику, в Кронштадт, в дивизион траловых катеров, разминировать район острова Лавансаари. Но ранение давало о себе знать, и его списали на берег, в команду, восстанавливавшую Кронштадский морской завод, а затем комиссовали из плавсостава. Так закончилась его служба в армии, о которой он написал в своих замечательных заметках «Невыдуманные рассказы».

После войны он восстановился в Ленинградском университете. Но зимой 1948 г. был арестован органами Ленинградского МГБ по обвинению в «создании антисоветской националистической еврейской организации с целью ослабления советского государственного строя» и осужден на 25 лет лагерей особого строгого режима (каторжных). Отсидев более 7 лет, З. С. Кауфман был реабилитирован и снова восстановлен в университете, который закончил в 1956 г. по специальности «биолог-зоолог». От времени поступления и до получения диплома прошло двенадцать лет!

Несколько лет Залман Самуилович проработал в Зоологическом институте АН СССР,

в 1960 г. окончил аспирантуру этого института, но, не имея в Ленинграде жилья, перевелся на работу в г. Петрозаводск. С 1961 по 1964 гг. работал на Беломорской биологической станции Карельского филиала АН СССР, в 1964–1974 гг. он – старший научный сотрудник Зоологического института АН СССР, с 1974 г. – ведущий научный сотрудник Отдела, а с 1991 г. – Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. Залман Самуилович почти 25 лет был научным руководителем коллектива по комплексному изучению Онежского озера. По результатам деятельности этого коллектива опубликованы статьи, монографии, защищены диссертации. В 1982 г. Залман Самуилович защитил докторскую диссертацию.

З. С. Кауфман был награжден многими боевыми и правительственными наградами, в том числе орденом Отечественной войны II ст. и медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II ст., почетными грамотами Президиума АН СССР, имел звание заслуженного деятеля науки Карелии, избирался «Человеком года Карелии». З. С. Кауфман всегда пользовался большим авторитетом у коллег, активно помогал научной молодежи. Талант Залмана Самуиловича многогранен. Он опубликовал несколь-

ко книг и около 200 статей не только по разным вопросам современной биологии, но и по иудаике и культуроведению, а также ряд рассказов. В частности, написал автобиографические произведения «Зяма» и «Невыдуманные рассказы». Залман Самуилович трудился до последних дней своей непростой жизни: увлеченно занимался вопросами иудаики, издал книгу «Краткий очерк истории еврейского искусства», написал и опубликовал ряд статей на интересующие его в этой области темы. Перед своим уходом он передал коллекцию бабочек и жуков в Национальный музей Карелии, а собрание книг личной библиотеки – в библиотеку Карельского научного центра РАН.

С 1956 года Залман Самуилович проживал в Петрозаводске вместе со своей супругой Ревеккой Соломоновной и сыном Борисом – талантливым ученым, доктором наук, который рано ушел из жизни.

В нашей памяти Залман Самуилович останется как замечательный ученый, исследователь, прекрасный рассказчик, писатель, защитник Родины, добрый и очень скромный человек, которого нам будет очень не хватать.

*Коллеги*

## ИВАН МИХАЙЛОВИЧ НЕСТЕРЕНКО (1930–2018)

15 ноября 2018 г. ушел из жизни известный ученый-гидролог, гидротехник, мелиоратор, заслуженный деятель науки Карельской АССР, заслуженный деятель науки РК, доктор технических наук Иван Михайлович Нестеренко. Он родился 2 января 1930 г. в с. Дьяченково Богучарского района Воронежской области. В 1939 г. вся его семья переехала в Москву, а с началом Великой Отечественной войны, как многодетная, направляется в эвакуацию и возвращается в Дьяченково. В 1947 г. по окончании средней школы в г. Богучаре он поступил на гидрометеорологический факультет Воронежского сельскохозяйственного института, который окончил с отличием в 1952 г. Затем был направлен на работу в сектор болотоведения и мелиорации Карельского филиала АН СССР в должности старшего лаборанта, в 1955 г. был переведен на должность старшего научного сотрудника.

Работая в Институте биологии, он прошел заочную аспирантуру, а в 1960 г. стал главным инженером Олонецкой машинно-мелиоративной станции.

В 1961 г. во ВНИИГиМе И. М. Нестеренко защитил кандидатскую диссертацию по теме «Осушение минеральных заболоченных земель озерно-ледниковых равнин Карельской АССР» и с августа 1962 г. работал в Институте биологии на должности и. о. зав. лаборатории болотоведения и мелиорации, где исследовал методы осушения тяжелых минеральных почв озерно-ледниковых равнин Карелии, уделяя при этом внимание изучению влияния различных мелиоративных мероприятий в сочетании с созданием дренажной сети.

В связи с реорганизацией Карельского филиала АН СССР с 1 июня 1963 г. на И. М. Нестеренко были возложены обязанности заместителя заведующего отделом гидрологии и водного хозяйства. В 1971 г. опубликована монография Ивана Михайловича «Мелиорация земель Европейского Севера СССР». С 1972 по 1975 гг.



он руководил Костомукшской комплексной экспедицией, материалы исследования которой по всесторонней оценке природных ресурсов использованы при проектировании и строительстве г. Костомукши и Костомукшского ГОКа, организации заповедника «Костомукшский». В 1982 г. он защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук на тему «Научное обоснование методов и способов осушения земель Европейского Севера СССР». Им разработаны научные основы и практические рекомендации по проектированию и строительству осушительных систем на Европейском Севере СССР. Под руководством И. М. Нестеренко выполнены комплекс-

ные программы по проектам «Ладога-Онега», «АИС Природа», «Сапропель», «Заонежье», издан «Медико-географический справочник Карельской АССР».

С марта 1986 г. И. М. Нестеренко исполнял обязанности председателя Президиума Карельского филиала АН СССР, а в марте 1988 г. общим собранием АН СССР был избран председателем Президиума, которым руководил до 1991 г.

При его активном участии Карельский филиал АН СССР в 1991 г. был преобразован в Карельский научный центр. Тогда же Иван Михайлович вместе со своей группой гидрологов переходит на работу в созданный при его содействии Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. Под руководством Ивана Михайловича в 1962 г. создан Корзинский стационар, на котором проводились комплексные исследования по программам природно-мелиоративного и экологического мониторинга. Основные исследования возглавляемого им коллектива посвящены изучению гидрологического режима озер и рек Карелии. Иссле-

дования И. М. Нестеренко и его коллег опубликованы в нескольких монографиях. С 1991 по 2014 гг. Иван Михайлович был членом Ученого Совета ИВПС КарНЦ РАН, активно участвовал в жизни института, и даже когда в 2014 г. вышел на пенсию, продолжал интересоваться деятельностью ИВПС.

И. М. Нестеренко награжден орденом Дружбы, юбилейной медалью «За доблестный труд» в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина, медалями «За преобразование Нечерноземья РСФСР», «50 лет Победы в ВОВ 1941–1945 гг.», золотой, серебряной и бронзовыми медалями ВДХН, почетными грамотами Президиума Верховного Совета КАССР, РАН, Министерства сельского, рыбного хозяйства и экологии РК.

Светлая память об Иване Михайловиче Нестеренко – ученом, организаторе, творческой личности, доброжелательном человеке – навсегда останется с нами.

*Коллеги*

## 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 её 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 высылаются 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 высылаются 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 отредактированы 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru), или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502). К рукописи желательно прилагать два бумажных экземпляра, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку.

## 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**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи\* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ\*\* должна быть лишена вводных фраз, создавать в 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. Желательно 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 вкладышах (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 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 представляются отдельными файлами с расширением TIF (\* .TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки из текста статьи должны быть убраны и представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указа-

\* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

\*\* Обращаем внимание авторов, что в связи с подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографических описаний и научного цитирования расширенная аннотация на английском языке, двуязычные таблицы и подписи к рисункам, а также транслитерированный в латиницу список использованной литературы приобретают особое значение.

нием 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, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ 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 groenlandicis* (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 общепотребительных.

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](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. Описания русскоязычных работ указываются 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 его библиографическое описание вместо транслитерированного. Библиографические 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. Шерудило<sup>1</sup>, М. И. Сысоева<sup>1</sup>, Г. Н. Алексейчук<sup>2</sup>, Е. Ф. Марковская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии Карельского научного центра РАН

<sup>2</sup> Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

**E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS**

Аннотация на английском языке

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ**

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) 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 <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	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:

(а) – 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.

В транслитерированном списке литературы:

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

В транслитерированном списке литературы:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsia 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.

В транслитерированном списке литературы:

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.

В транслитерированном списке литературы:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhhvidovykh 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 vozdeistviyu [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.

В транслитерированном списке литературы:

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.

В транслитерированном списке литературы:

Grebenshchikov Ya. P. K nebol'shomu 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).

В транслитерированном списке литературы:

*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.

В транслитерированном списке литературы:

*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. 3, 2019**  
**“Limnology and Oceanology” Series**

**TABLE OF CONTENTS**

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

A. V. Zimin, A. V. Tolstikov. STRUCTURE AND VARIABILITY OF THE MAIN FRONTAL ZONES IN THE WHITE SEA DURING THE WARM SEASON 2010 . . . . . 5

O. B. Akulova, V. I. Bukatiy, K. V. Marusin. SPATIAL VARIABILITY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE TELETSKOYE . . . . . 16

E. A. Morozov, D. V. Kondrik, S. S. Chepikova, D. V. Pozdnyakov. ATMOSPHERIC COLUMNAR CO<sub>2</sub> ENHANCEMENT OVER *E. HUXLEYI* BLOOMS: CASE STUDIES IN THE NORTH ATLANTIC AND ARCTIC WATERS . . . . . 28

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

V. A. Dauvalter. THE EFFECT OF MINING AND ORE PROCESSING EFFLUENTS ON MERCURY CONTENT IN ARCTIC LAKE SEDIMENTS . . . . . 34

A. V. Ryzhakov, V. V. Vapirov, I. A. Stepanova. SILICON IN SURFACE WATERS OF THE HUMID ZONE (THE CASE OF KARELIAN WATERBODIES) . . . . . 52

A. V. Leonov, M. V. Zobkova. GENERAL CHARACTERISTICS OF BOD KINETICS IN LONG-TERM EXPERIMENTS WITH WATER FROM KARELIAN WATERBODIES OF VARIOUS TYPES . . . . . 61

PALEOLIMNOLOGY

T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova. PALEOGEOGRAPHIC CONDITIONS OF LAKE FORMATION ON ANDOMA ICE-DIVIDE UPLAND . . . . . 80

RESEARCH METHODS

N. N. Filatov, A. V. Isaev, O. P. Savchuk. ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE AND FORECASTING OF CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME AND ECOSYSTEMS OF LARGE LAKES . . . . . 99

B. O. Tsydenov. NUMERICAL MODELING OF SPRING PLANKTON DYNAMICS IN THE SELENGA SHALLOW WATERS OF LAKE BAIKAL . . . . . 114

CHRONICLE

V. O. Polyanin. A résumé of Russian participation in the conference “Lakes 2018: Conservation and Sustainable Management of Riverine Ecosystems” (Moodbidri, India, November 22–25, 2018) in the framework of cooperation between Russia and India on water issues . . . . . 124

A. V. Zimin. Conference “Hydrometeorology and Ecology: Scientific and Educational Achievements and Development Prospects” (St. Petersburg, December 19–20, 2018) . . . . .	128
--	-----

BEREAVEMENTS

Zalman S. Kaufman (1921–2019) . . . . .	130
---	-----

Ivan M. Nesterenko (1930–2018) . . . . .	132
--	-----

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . .	134
------------------------------------	-----

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 3, 2019

Серия 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 21.03.2019. Дата выхода 30.03.2019. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 15,3. Усл. печ. л. 16,5.  
Тираж 150 экз. Заказ 545. 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