

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 10, 2017

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2017

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.; А. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; 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. ХОЛТА, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

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. ISAIEV, 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.

Редакционная коллегия серии «Лимнология»

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

Editorial Board of the Limnology Series

N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; Yu. N. LUKINA, PhD (Biol.); L. E. Nazarova (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. ROZENTAU, PhD; A. V. RYZHAKOV, PhD (Chem.); D. A. SUBETTO (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geog.); A. Yu. TERZHEVIK, PhD (Tech.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.).

ISSN 1997-3217 (печатная версия)

ISSN 2312-4504 (онлайн-версия)

Адрес редакции: 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

тел. (8142)762018; факс (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

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

© Карельский научный центр РАН, 2017

© Институт водных проблем Севера Карельского
научного центра РАН, 2017

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.55 (282.256.21)

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КРУПНЕЙШИХ ОЗЕР ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

К. К. Эдельштейн¹, А. М. Алабян¹, С. Л. Горин², А. А. Попрядухин¹

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии, Москва

Приводятся результаты гидрологического обследования в сентябре 2007 года крупнейших озер полуострова Ямал: Нейто 1-е, Нейто-Ерто, Нейто-Малто, Ямбудо и Ярато 2-е. Определены морфометрические характеристики этих водоемов, оценено гидрологическое состояние их водных масс на исходе летне-осенней межени. Отмечено, что крупнейшие озера Ямала имеют сложный рельеф котловины, обусловленный наличием глубоко врезаемых в поверхность дна криптодепрессийных впадин. Среди них есть как мелководные водоемы со средней глубиной менее 3 м, так и озера, средняя глубина которых превышает 10–20 м. Для водных масс озер характерно хорошее перемешивание по вертикали (даже в глубоководных впадинах), вызванное активным воздействием ветра и конвекции, а также крайне низкая минерализация и очень малое содержание гидрокарбонатных ионов (из-за подавляющего преобладания атмосферных осадков в приходной части водного баланса). Зеленоватая окраска воды в некоторых из обследованных озер и ее умеренное пересыщение кислородом во всех водоемах свидетельствуют о значительном развитии холодолюбивых видов фитопланктона (в вегетационный период этому способствует большая продолжительность светового дня).

Ключевые слова: озеро; гидрологический режим; морфометрия; минерализация; температура; химический состав воды; Нейто; Ямбудо; Ярато; Ямал.

**K. K. Edelstein, A. M. Alabyan, S. L. Gorin, A. A. Popryadukhin.
HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE LARGEST
LAKES OF THE YAMAL PENINSULA**

The results of hydrological survey of the largest lakes of the Yamal Peninsula – Neyto 1st, Neyto-Erto, Neyto-Malto, Yambudo and Yarato 2nd, undertaken in September 2007 are presented. The morphometric characteristics of these lakes as well as the hydrological properties of their water at the end of the autumn low water stage were determined. Many of the largest lakes of Yamal have a complex bottom topography due to the presence of cryptodepressions cutting deeply into the bottom. They are both shallow lakes with an

average depth less than 3 m and lakes with average depths exceeding 10–20 m. There is thorough vertical mixing of the water masses (even in deep-water hollows) due to the impact of wind and convection. Extremely low mineralization and very low content of hydrocarbonates in the water result from the dominance of atmospheric precipitation in the input part of the lake water balance. Greenish coloring of water in some of the surveyed lakes and moderate supersaturation with oxygen in all the lakes evidence a considerable development of cold-loving phytoplankton species (during the growing season it is promoted by a longer daylight duration).

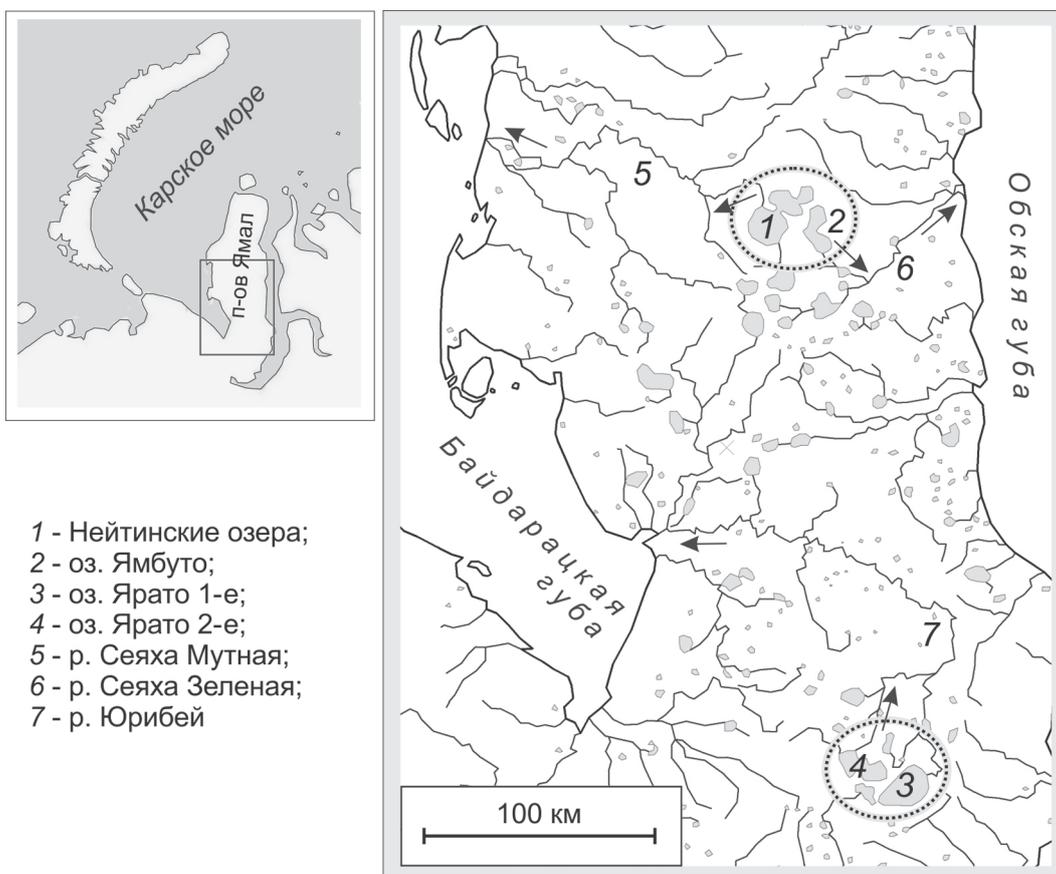
К e y w o r d s: lake; hydrological regime; morphometry; mineralization; temperature; chemical composition of water; Neyto; Yambuto; Yarato; Yamal.

*Посвящается памяти
друга и коллеги Л. Ю. Мача*

Введение

На полуострове Ямал среди десятков тысяч малых водоемов, в основном термокарстовых аласов, особо выделяются две группы относительно больших озер. Первая группа водоемов находится в центре полуострова; в нее входят Нейтинские озера (соединенные проливами озера Нейто 1-е, Нейто-Ерто, Нейто-Малто), а также отделенное от них узким перешейком оз. Ямбуто. Вторая группа расположена

на 270 км южнее первой; она состоит из озер Ярато 1-е и Ярато 2-е (рис. 1). Обе группы озер находятся на плоской поверхности слегка приподнятого над окружающей низменностью водораздела, с которого небольшие реки стекают как на запад – в Карское море, так и на восток – в Обскую губу. В сентябре 2007 г. все перечисленные озера были одновременно обследованы двумя полевыми отрядами экспедиции с участием сотрудников кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ в рамках работ, выполняемых по заказу Департамента природно-ресурсного регулирования, лесных отношений и развития нефтегазового комплекса Ямало-Ненецкого автономного



- 1 - Нейтинские озера;
- 2 - оз. Ямбуто;
- 3 - оз. Ярато 1-е;
- 4 - оз. Ярато 2-е;
- 5 - р. Сеяха Мутная;
- 6 - р. Сеяха Зеленая;
- 7 - р. Юрибей

Рис. 1. Гидрографическая сеть в районе экспедиционных работ

округа [Алабян и др., 2008]. Цель работы состояла в экспресс-оценке водных ресурсов трех речных систем, берущих свое начало в перечисленных озерах, на исходе летней межени.

Первые научные сведения об озерах Ямала были опубликованы Борисом Михайловичем Житковым (1872–1943) – зоогеографом, профессором Московского университета и Петровской сельхозакадемии (МСХА им. Тимирязева), руководителем комплексной экспедиции, которая под эгидой Русского географического общества провела широкомасштабные исследования полуострова Ямал в 1908 г. [Житков, 1913]. Эта экспедиция выполнила полуинструментальную съемку береговой линии Нейтинских озер и оз. Ямбуто; частично полуинструментальную, а частично глазомерную съемку береговой линии озер Ярато 1-е и Ярато 2-е; несколько измерений глубины, толщины льда, высоты снежного покрова, а также температуры воды в озерах Ярато 1-е, Ямбуто и Нейто-Малто в конце периода ледостава [Житков, 1913, с. 31, 90, 105, 144, 149].

До настоящего времени работа Б. М. Житкова остается единственной публикацией, в которой содержатся конкретные, хотя и очень ограниченные, сведения о рассматриваемых озерах. По крайней мере в недавней – весьма подробной – монографии, касающейся вопросов гидрологии Ямала, никаких сведений об этих озерах, а также о посвященных им публикациях нет [Гидрология..., 2009, с. 347]. Отметим, что эта монография подготовлена в Государственном гидрологическом институте – головной организации в исследованиях рек и озер России (и полуострова Ямал в частности), обладающей всей полнотой существующей гидрологической информации. Возможно, какие-то архивные данные есть в научных организациях системы Росрыболовства, которые в прошлом веке проводили оценку рыбных ресурсов водоемов Ямала [Гидрология..., 2009, с. 9], однако в открытых источниках информацию о результатах этих работ найти не удалось.

В целом более-менее определенные представления о гидрологическом режиме озер Ямала можно получить только из двух печатных работ – из упомянутой выше монографии 2009 г. [Гидрология..., 2009], а также из опубликованной в 1977 г. крупной работы «Ямало-Гыданская область (физико-географическая характеристика)» [1977]. В обеих монографиях на примере нескольких небольших озер рассматривается рельеф озерных котловин, динамика водных масс, теплообмен (внутренний и с атмосферой), режим кислорода, ионный состав воды, отдельные характеристики ледового режима и некоторые другие вопросы. Поскольку в этих монографиях

исследовавшиеся нами озера не обсуждаются, представленные в них сведения для настоящей статьи имеют лишь общий интерес.

Состав работ и погодные условия

Наши полевые исследования проводились с 13 по 25 сентября 2007 г. Каждое озеро обследовалось в течение 1–2 дней, при этом выполнялись промеры глубин, описание отдельных участков берега, зондирование водной толщи на нескольких вертикалях, а также отбор одной пробы воды из поверхностного слоя на лабораторный химический анализ. Промеры делались эхолотом Lowrance серии LMS со встроенным приемником GPS. В Нейтинских озерах и оз. Ямбуто глубины измерялись по косым галсам, в оз. Ярато 2-е – по одному продольному и нескольким поперечным профилям. В районах обнаружения донных котловин или поднятий промеры сгущались. В целом результаты промеров глубин следует считать приблизительными. Описание берегов в некоторых местах сопровождалось измерениями превышений с помощью оптического нивелира CST. Для зондирования использовались полевые анализаторы IRS и YSI-556 (длина кабеля 30 и 20 м соответственно), при этом измерялись температура и электропроводность воды, а также содержание в ней растворенного кислорода. Пробы воды в Нейтинских озерах отбирались в центре акваторий, в оз. Ямбуто – на северном плесе, в оз. Ярато 2-е – над точкой с наибольшей глубиной, а в оз. Ярато 1-е – у северо-западного подветренного берега.

Во время работ стояла благоприятная, весьма нехарактерная для сентября на Ямале умеренно теплая погода: температура воздуха днем повышалась до 0–9 °С, а ночью снижалась до –2...–5 °С. Преобладали южные и восточные ветры (в среднем 5–7 м/с), в отдельные дни усиливавшиеся до 15–20 м/с, периодически выпадали небольшие осадки в виде дождя и мокрого снега. Уровень воды в озерах и реках был стабильным и близким к среднеминимальному летне-осеннему. В целом погода в период наблюдений способствовала возникновению ночного конвективного и дневного ветрового перемешивания озерных вод.

Особенности формы чаш и гидрологического состояния озер

Геологическое строение полуострова отражает регрессивное смещение береговой линии Северного Ледовитого океана. К концу плейстоцена здесь накопилась, по данным

бурения, 40–50-метровая толща морских осадков (бованенковская свита). Поэтому поверхность полуострова представляет собой пологую низменную заболоченную равнину. Характерная черта ее рельефа – террасированность поверхности вследствие термоабразионных процессов в период импульсного (пошагового) понижения уровня океана в голоцене. Наиболее обширна третья (Салехардская) морская терраса, имеющая абсолютные отметки от 15 до 95 м. Крупные останцы этой террасы служат водоразделами речных бассейнов, на них расположены котловины реликтовых озер групп Нейто-Ямбудо и Ярато [Эрозионные процессы..., 1999].

Представленное ниже описание разделено на две части: первая посвящена группе водоемов в центре Ямала (Нейтинские озера и оз. Ямбудо), а вторая часть – Яратинским озерам на юге полуострова.

Нейтинские озера и озеро Ямбудо

Эта группа водоемов состоит из соединенных проливами Нейтинских озер (Нейто 1-е, Нейто-Ерто, Нейто-Малто), а также из

отделенного от них узким перешейком озера Ямбудо (рис. 1). Нейтинские озера имеют сток на запад через р. Сеяха-Мутная (впадает в Карское море), а оз. Ямбудо – на восток по р. Сеяха-Зеленая (в Обскую губу).

Озеро Нейто 1-е (Нгэвахыто, Нгайвогыто; 70°10' с. ш., 70°48' в. д.) – в переводе с ненецкого «налимье озеро» [Житков, 1913, с. 302]. Самое северное озеро в Нейтинской системе (рис. 2); наименьшее в системе по площади, но наибольшее по глубине и объему водной массы (табл. 1). Отметка меженного уровня воды ок. 17 м абс¹.

Котловина озера – криптодепрессия; по своим очертаниям она почти круглая, лишь с запада немного сдавлена конусом выноса наносов речки Танюйяха. Протяженность озера с юга на север 7,9 км, с запада на восток – 8,0 км. Прибрежная отмель в озере имеет ширину 300–400 м, глубина в ее пределах не превышает 0,5 м. На отмели есть несколько ориентированных вдоль берега гряд высотой 0,1–0,3 м. Береговой склон имеет

¹ Здесь и далее отметки уровня воды в озерах даются по топографическим картам масштаба 1:100 000.

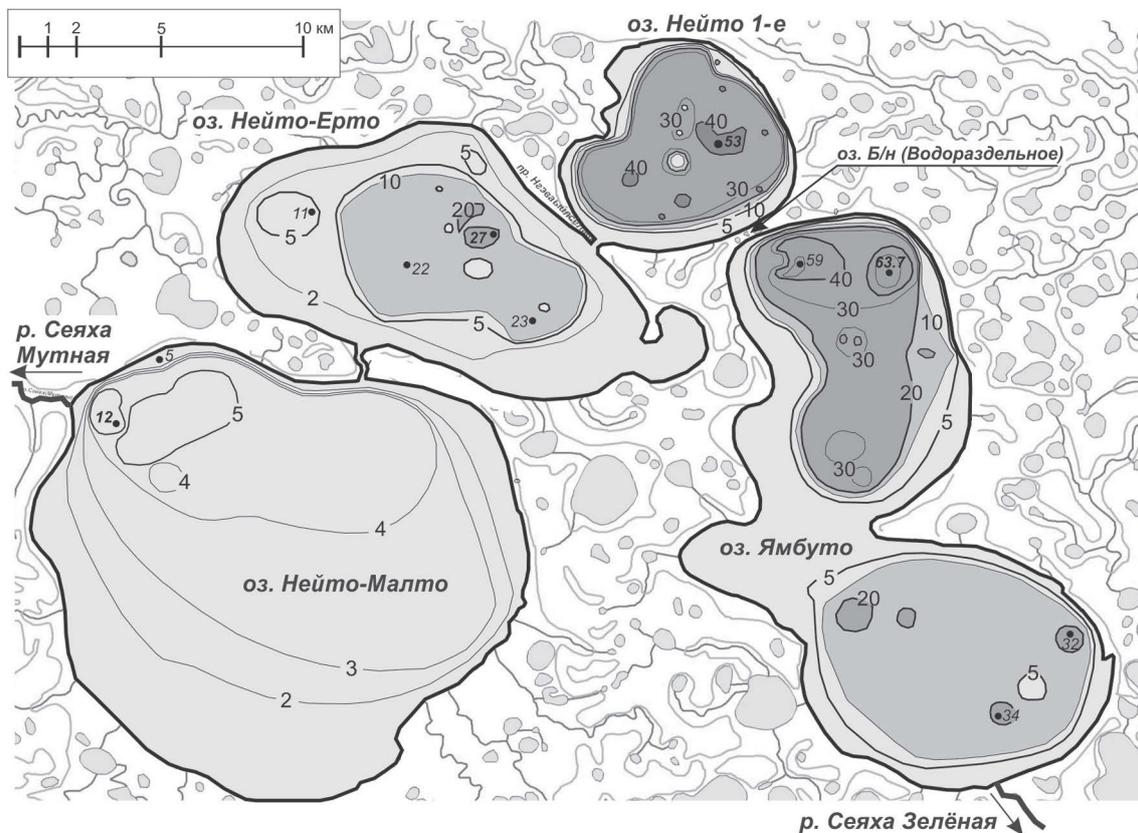


Рис. 2. Батиметрические схемы группы озер Нейто-Ямбудо (по результатам промеров экспедиции в сентябре 2007 г.). Топооснова – космические снимки и карты генерального штаба масштаба 1:100 000 и 1:200 000. Положение береговой линии озер соответствует урезу воды в сентябре 2007 г.

Таблица 1. Морфометрические характеристики крупнейших озер полуострова Ямал

Озеро	Площадь, км ²		φ	W, млн м ³	Глубина, м		w	l ₀ , км	L, км	B, км
	F	A			H _{ср}	H _{макс}				
Нейто 1-е	46,4 (-)	181 (-)	3,9	1125	24,3	52,8	0,46	28,9	8,0	7,9
Нейто-Ерто (Ней-То Ер-То)	104 (116)	160 (386)	1,5	650	6,3	27,3	0,23	51,5	17,4	8,6
Нейто-Малто (Ней-То Мал-То)	214 (215)	488 (515)	2,3	631	2,9	12,1 (4)	0,17	58,9	17,8	16,5
Ямбуто (Ямбу-То)	169 (169)	270 (285)	1,6	2350	13,9	63,7	0,22	67,0	21,6	10,3
Ярато 1-е (Ярро-То 1-е)	245 (247)	478 (944)	1,9	--	--	-- (8)	--	65,6	24,2	13,9
Ярато 2-е (Ярро-То 2-е)	150 (154)	928 (1080)	6,2	320	2,1	21,3 (8)	0,10	63,1	22,1	9,4

Примечание. Площадные характеристики определялись на основе совместного анализа космических снимков, топографических карт масштаба 1:100 000 и данных наших полевых наблюдений. F – площадь акватории озера; A – площадь водосбора, км²; $\varphi = A/F$ – удельный водосбор; W – объем водной массы; H_{ср} и H_{макс} – средняя и максимальная глубина (по результатам промеров экспедиции в сентябре 2007 г.); w = H_{ср} / H_{макс} – коэффициент емкости озерной чаши; l₀ – длина береговой линии; L – длина озера; B – максимальная ширина озера; в скобках приведены справочные данные [Доманицкий и др., 1971, с. 82].

ширину 600–800 м, у его подножия глубина достигает 30 м. В целом изобата 30 м повторяет очертания береговой линии. Диаметр глубоководного центра озера 5–6 км. В его пределах имеется несколько впадин глубиной >40–50 м, а также поднятий (банок), над которыми глубина <5–6 м. Линейные размеры впадин и банок сопоставимы – 200–1000 м.

Берега озера преимущественно обрывистые, высотой до 12–15 м, подвержены абразии, сложены мелким песком крупностью около 0,1 мм. В полосе береговой отмели встречаются участки более крупного песка (0,15–0,2 мм), а небольшие отрезки низкого берега сложены алевритом (0,05 мм). Судя по характеру прибрежной растительности и морфологическим признакам котловины, максимальный уровень воды в этом озере превышает меженный (осенний) не более чем на 0,8–1,2 м. Нивелирование показало, что на этом же уровне находится лайда¹ в районе впадения р. Танюйяха, а также на восточном берегу озера у высокого уступа морской террасы.

Озеро Нейто-Ерто (70°09' с. ш., 70°32' в. д.) – в переводе с ненецкого «среднее налимье озеро» [Житков, 1913, с. 302]. Озеро находится в центре Нейтинской системы (рис. 2); в юго-западной части водоем соединяется с оз. Нейто-Малто, а на северо-востоке – с оз. Нейто 1-е (на некоторых картах пролив между этими озерами называется Нгэвахыйд-селава) (рис. 3). Во время обследования – в сентябре 2007 г. – вода из Нейто 1-е через

пролив текла в Нейто-Ерто. Скорость потока при этом достигала 1,2 м/с.

Основная котловина озера – криптодепрессия эллипсообразной формы, вытянутая с северо-запада на юго-восток на 15 км. На юго-востоке к ней примыкает залив – небольшая по размерам и неглубокая котловина термокарстового происхождения. По-видимому, озеро и залив между собой соединились благодаря абразионным процессам. Общая длина оз. Нейто-Ерто (вместе с заливом) – 17,4 км. Глубины в этом озере значительно меньше, чем в озере Нейто 1-е, но все же относительно велики: средняя глубина превышает 5 м, а максимальная лишь немногим меньше 30 м (табл. 1). Площадь Нейто-Ерто – более 100 км², протяженность береговой линии – свыше 50 км, объем водной массы – вдвое меньше, чем в Нейто 1-е, из-за меньшей глубины (табл. 1). Отметка меженного уровня воды – ок. 17 м.

В период наших наблюдений вода в озере имела отчетливый зеленоватый оттенок (скорее всего, из-за обилия фитопланктона). Зондирование водной толщи на наиболее глубокой вертикали в средней части озерной чаши показало отсутствие значимых вертикальных градиентов температуры, электропроводности воды и содержания кислорода (табл. 2). Эта же однородность прослеживалась и в других обследованных нами озерах Нейтинской группы. Скорее всего, она была следствием интенсивного конвективного и ветрового перемешивания водной массы в озерах. Также наши данные подтвердили тот очевидный факт, что в период осеннего выхолаживания температура воды в более глубоких озерах выше, чем в менее

¹ Лайда (фин.) – низменное периодически затопляемое побережье, обычно заболоченное, часто с неглубоко залегающей мерзлотой.

Таблица 2. Данные полевого зондирования водных масс в озерах группы Нейто-Ямбуто (14–21 сентября 2007 г.)

Озеро	Температура, °С	Насыщение кислородом, %	Электропроводность, мкСм/см
Нейто 1-е	6,9	148	21
Нейто-Ерто	6,8	144	37
Нейто-Малто	5,3	158	29
Б/н (Водораздельное)	5,9	142	17
Ямбуто	6,7	154	64

Примечание. В каждом озере измерения производились на двух-трех вертикалях, при этом измеренные величины в пределах одного водоема различались несущественно (как по площади, так и по глубине); предельная глубина измерений ограничивалась 30 м (длиной кабеля прибора).

глубоких водоемах (табл. 2). Следует отметить, что во всех обследованных нами озерах, независимо от их глубины, наблюдалось пере- насыщение воды кислородом (табл. 2). В работе [Ямало-Гыданская область..., 1977, с. 162] подобное явление объясняется массовым развитием фитопланктона и малой интенсивностью окислительных процессов при низкой температуре воды. Электропроводность воды во всех водоемах была очень низкой (табл. 2).

Из оз. Нейто-Ерто вода текла в оз. Нейто-Малто по извилистой и мелкой (<0,3 м) протоке (проливу) Ерто-Езилово, которая на своем пути пересекает разрушенный абразионными процессами перешеек. Длина протоки 1,5 км, ширина 50–60 м. В ее русле, как в меандрирующей реке, плесовые лощины приурочены к под- мываемым вогнутым берегам излучин, а пере- каты – к прямолинейным участкам. У выпуклых берегов излучин заметны хорошо сформиро- ванные побочни. Глубина лощин 1,0–1,2 м, на перекатах до 0,5–0,6 м. Русло сложено песком

крупностью 0,10–0,12 мм. Морфологические признаки свидетельствуют о том, что течение из оз. Нейто-Ерто в оз. Ерто-Малто преобла- дает над обратным течением (если таковое бывает). Уклон водной поверхности в протоке в среднем составлял 5 см/км, скорость течения была 0,3–0,4 м/с, расход воды – 4,8 м³/с.

Озеро Нейто-Малто (70°05' с. ш., 70°20' в. д.). Этот водоем принимает воду из озер Нейто 1-е и Нейто-Ерто и таким образом замыкает нейтинскую озерную систему. Сток воды из него осуществляется по р. Сеяха-Мут- ная, которая вытекает из северо-западного угла озера (рис. 2) и впадает в р. Мордыяха (бассейн Карского моря, рис. 1). Оз. Нейто-Малто имеет самую большую площадь (более 200 км²) среди нейтинских озер и является вторым по площади водоемом на полуострове Ямал (после Ярато 1-го, табл. 1).

Котловина озера в плане имеет округлую форму, ее протяженность с юга на север со- ставляет 17,8 км, с запада на восток – 16,5 км,



Рис. 3. Переход одного из отрядов экспедиции по проливу из оз. Нейто-Ерто в оз. Нейто 1-е (сентябрь 2007 г.). Фото Л. Мача

а длина береговой линии почти 60 км. Несмотря на столь внушительные размеры, озеро мелководное – средняя глубина в нем менее 3 м (табл. 1). Поэтому объем озера почти такой же, как у вдвое меньшего по площади Нейто-Ерто (табл. 1; рис. 4).

Береговая отмель глубиной до полуметра в северо-восточной части акватории имеет ширину 300–400 м, в юго-западной – 500–800 м. Ее поверхность покрыта несколькими грядами высотой 0,1–0,3 м, ориентированными вдоль уреза. Береговой склон лучше выражен в северной части озерной чаши – здесь на небольшом расстоянии от берега глубина достигает 4–5 м. В южной части озера глубина увеличивается более плавно и в целом не превышает 3–4 м. Наибольшие глубины зарегистрированы в северной (17,1 м)

и северо-восточной (11,8 и 12,0 м) частях водоема. Рельеф дна в глубоководной части озера весьма неоднороден – термокарстовые углубления диаметром 100–800 м чередуются с аналогичными по размерам и очертаниям возвышенностями, глубина над которыми не превышает 4–6 м.

Отметка меженного уровня воды составляет около 17 м. Судя по морфологическим признакам на берегах и характеру прибрежной растительности, максимальные уровни воды в озере превосходят меженные не более чем на 0,7–1,0 м. Берега озера обрывистые, высотой до 20–25 м, на южном участке – до 2–5 м. Сложены берега песками крупностью около 0,1 мм. В полосе приобья встречаются участки хорошо сортированного песка крупностью 0,15–0,25 мм с включениями слабоокатанного гравия

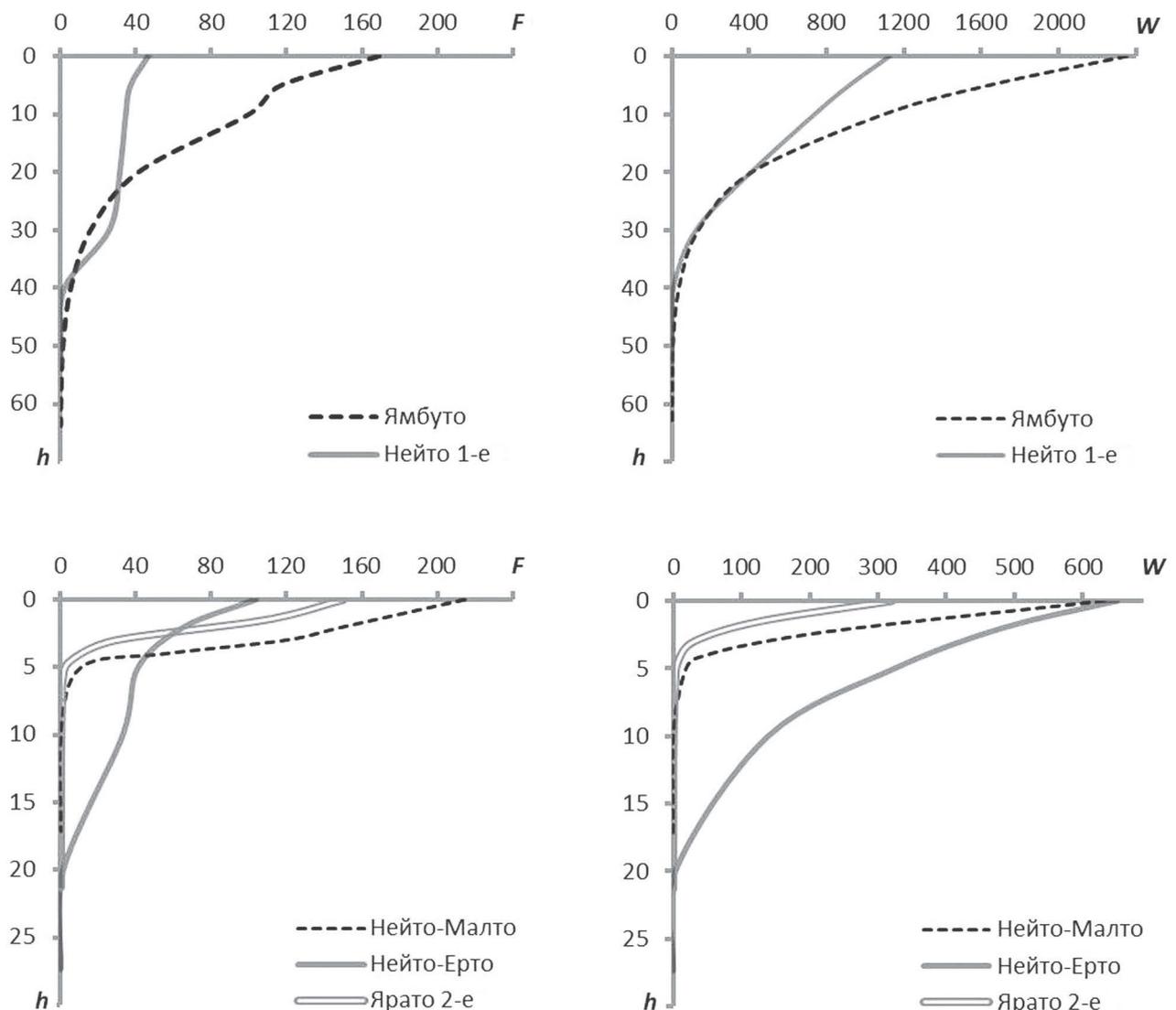


Рис. 4. Батиграфические кривые озер, обследованных экспедицией в сентябре 2007 г.: F – площадь водной поверхности, км²; W – объем воды, млн м³; h – глубина, м

величиной 1–2 см (иногда даже до 3–4 см). Высокие берега расчленены оврагами и долинами ручьев, практически повсеместно отмечаются признаки абразии средней интенсивности. В северной части озера обнаружено обнажение пластовых льдов (рис. 5).

Вода в озере Нейто-Малто имела меньшую температуру, чем в двух других озерах Нейтинской системы. Это обусловлено мелководностью водоема, которая благоприятствует активному ветровому перемешиванию и выхолаживанию его водной массы. Величины электропроводности воды и содержания в ней растворенного кислорода были близки к тем же характеристикам в других озерах этой группы (табл. 2). Вода в озере имела белесовато-зеленый оттенок, который, скорее всего, объясняется достаточно высокими концентрациями минеральной взвеси и фитопланктона. В истоке вытекающей из озера р. Сеяха-Мутная глубина потока не превышала 0,3 м, а ширина составляла 30–50 м; измеренный расход воды составил 20,2 м³/с (это в 4 раза больше расхода воды, поступающей в озеро через протоку Ерто-Езилово).

Озеро без названия (Водораздельное; 70°08'18" с. ш., 70°49'38" в. д.). К юго-востоку от оз. Нейто 1-е находится еще одно крупное озеро – Ямбуто (рис. 2), а на перешейке между ними, на морской террасе – озерко без

названия. Оно представляет собой типичный старый термокарстовый алас в округлой, слегка вытянутой в широтном направлении чаше диаметром 70–90 м. Глубина в нем постепенно увеличивается от 0,4–0,6 м у уреза до 2,4 м в центральной части. Берега озерка ровные, местами заболоченные, покрыты тундровой растительностью и осокой, сложены мелким песком. Высота берега 0,10–0,15 м; высота перешейка со стороны оз. Нейто 1-е – 0,2 м, со стороны Ямбуто – 0,9 м. Дно озерка сложено песками и алевритами крупностью 0,05–0,10 мм с незначительными признаками торфонакопления. Вода в озере по электропроводности сравнима с дистиллятом (табл. 2).

Здесь уместно упомянуть о следующем. В книге Б. М. Житкова [1913] сообщается о том, что в XVII в. озера Нейтинской системы и Ямбуто служили важным звеном на купеческом пути из Архангельска в Мангазею (богатый торговый город, тогда находившийся в нижнем течении р. Таз). Опираясь на исторические документы, собственные наблюдения и опросы местных жителей, Б. М. Житков установил, что торговые суда, пересекавшие Ямал со стороны Карского моря, сначала поднимались по рекам Мордыяха и Сеяха-Мутная до Нейтинских озер, потом переволакивались из оз. Нейто 1-е в оз. Ямбуто и из него спускались в Обскую губу по р. Сеяха-Зеленая [Житков, 1913,



Рис. 5. Обнажение пластовых льдов в клифе северного берега оз. Нейто-Малто (сентябрь 2007 г.). Фото Л. Мача

с. 4, 143]. Место волока, по мнению Б. М. Житкова [Там же, с. 40], находилось в самом узком месте разделяющего озера Нейто 1-е и Ямбуто перешейка – вблизи оз. Луце-Хавы-то. Судя по представленной в [Житков, 1913] карте, под этим названием автор подразумевал водоем, находящийся в ~200 м к ВЮВ от обследованного нами озера.

Озеро Ямбуто (70°09' с. ш., 70°50' в. д.) – в переводе с ненецкого «длинное озеро» [Житков, 1913, с. 306]. Третье по площади озеро полуострова Ямал (после Ярато 1-е и Нейто-Малто, см. табл. 1) и первое по объему воды, сопоставимому с суммарным объемом (2,4 км³) всех трех озер Нейтинской системы. По данным [Доманицкий и др., 1971, с. 82], высота уреза воды озера около 16 м абс. Нивелирование позволило установить, что осенью 2007 г. уровень воды в озере Ямбуто был на 0,6 м ниже, чем в соседнем с ним озере Нейто 1-е (близкие результаты были получены и в экспедиции Б. М. Житкова [1913, с. 144]). По нашим измерениям, максимальная глубина в озере Ямбуто достигает 63,7 м, что пока является наибольшей величиной из зарегистрированных в озерах Ямала. Об этом же писал и Б. М. Житков: «Самоеды говорили мне, что они считают это озеро самым глубоким на Ямале и что оно замерзает позже всех других озер» [Житков, 1913, с. 98]. Морфологически сложная, вытянутая с севера на юг котловина озера объединяет два крупных (рис. 2) и несколько мелких озер, соединившихся друг с другом вследствие разрушения их берегов абразионными и термокарстовыми процессами. На восточном берегу озера, на стыке котловин северного и южного плесов, в акваторию озера на 5 км вдается крупный полуостров, оканчивающийся мысом Ямбунгари. С противоположного берега выступают мысы Лохосаля, Пирцясаля и Хунгхобасаля (рис. 2).

Длина оз. Ямбуто более 20 км, максимальная ширина северного плеса – 8,4 км, южного – 10,3 км, а между мысами Пирцясаля и Ямбунгари в центре акватории она сокращается до 4,0 км. Глубина здесь не превышает 5 м, тогда как «фоновая» глубина северной котловины – 20–25 м, а южной – 10–15 м. В северном плесе на дне имеется углубление округлой формы диаметром 4–5 км, в пределах которого глубина превышает 30 м (рис. 2). В дне этого углубления обнаружено две воронки диаметром 500–1500 м с глубинами более 50–60 м (рис. 2). В одной из них зафиксирована максимальная для всего озера глубина. Рельеф южного плеса имеет более правильные очертания, чем северного (рис. 2). Но и здесь есть несколько

небольших в поперечнике, но относительно глубоких воронок (в одной из них глубина достигает 34,8 м). О наличии воронок на дне озер полуострова Ямал было известно и ранее; их происхождение пока не изучено, но в работе [Ямало-Гыданская область..., 1977, с. 157] предполагается, что впадины, осложняющие рельеф озерного дна, связаны с вытаяванием инъекционных ледяных образований.

В озере Ямбуто прибрежная отмель с глубинами до 0,3–0,5 м в основном имеет ширину до 300–400 м, но у мысов она увеличивается до 500–800 м. Местами на ее поверхности встречаются серии песчаных гряд, вытянутых вдоль береговой линии.

Берега озера преимущественно обрывистые, высотой до 11–14 м. В южной части озера, у истоков р. Сеяха-Зеленая, высота клифа ниже – до 2–4 м. На высоких берегах заметны проявления интенсивной абразии и эрозийного расчленения. Высокие берега сложены мелким песком крупностью около 0,1 мм, а низменные участки, представляющие собой лайду и речную пойму, – алевритом 0,05 мм с прослоями песка 0,1–0,15 мм. Берега покрыты тундровой растительностью. Судя по характеру прибрежной растительности и некоторым морфологическим признакам, максимальный уровень воды в озере Ямбуто, как и в трех Нейтинских озерах, превосходит меженный не более чем на 0,5–0,7 м.

Зондирование оз. Ямбуто на вертикали с глубиной ок. 30 м показало схожую с Нейтинскими озерами картину: его водная толща была хорошо перемешана по глубине, пересыщена кислородом, имела более высокую, чем у окружающего воздуха, температуру и в целом низкую электропроводность (табл. 2). В качестве характерного признака воды в озере Ямбуто следует указать на то, что ее электропроводность была почти в 2 раза больше, чем в Нейтинских озерах (табл. 2).

О зимнем режиме оз. Ямбуто, так же как и Нейтинских озер, ничего не известно. Лишь в монографии Б. М. Житкова есть сведения о том, что на исходе зимы 1908 г. толщина льда на поверхности озера составляла около 2,0 м [Житков, 1913, с. 90].

Оз. Ямбуто сточное – из его южного плеса вытекает р. Сеяха-Зеленая, которая, минуя ряд озер, впадает в Обскую Губу. Ненецкое название «Сеяха» означает «проходная река», а русское «Зеленая» появилось благодаря зеленоватому оттенку ее воды (в противовес Сеяхе-Мутной, вытекающей из оз. Нейто-Малто в западном направлении). Порог истока очень мелкий – в сентябре 2007 г. глубина над ним не

превышала 0,1 м (при ширине русла 30–50 м). Сразу за порогом глубина реки увеличивалась до 1,2–1,5 м, что, по-видимому, было связано с интенсивной эрозией во время прохождения высоких расходов воды в половодье. В сентябре 2007 г. расход воды в истоке реки составил 8,1 м³/с.

Яратинские озера

Озера Ярато 1-е и Ярато 2-е находятся на юге полуострова Ямал (рис. 1). Оба водоема сточные – из первого вытекает р. Правый Юрибей, а из второго – Левый Юрибей, которые при своем слиянии образуют крупнейшую реку полуострова – Юрибей. Река течет на запад и впадает в Карское море.

Озеро Ярато 2-е (68°00' с. ш., 71°10' в. д.) – в переводе с ненецкого «песчаное озеро». Высота озера над уровнем моря 28 м [Доманицкий и др., 1971, с. 82], то есть оно лежит на 11–12 м выше Нейтинских озер. Промеры глубин в озере показали, что более 80 % его акватории (и более 90 % объема водной массы) приходится на мелководья с глубинами менее 3,0 м (рис. 6). В большей части озера дно ровное, без значительных перепадов глубин. При этом так же, как и в описанных выше водоемах, в котловине оз. Ярато 2-е есть глубокая воронка (рис. 6 и 7). Она находится у юго-восточного берега озера и имеет эллипсовидную форму. Длина и ширина воронки составляют 2,0 и 0,5 км, а глубина в ее пределах достигает 21,3 м.

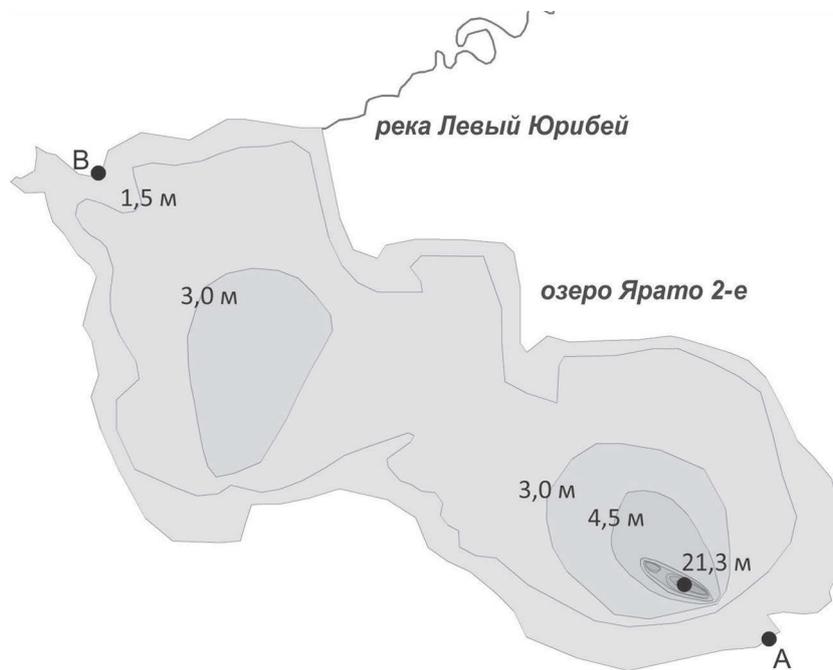


Рис. 6. Батиметрическая схема оз. Ярато 2-е (по результатам промеров в сентябре 2007 г.)

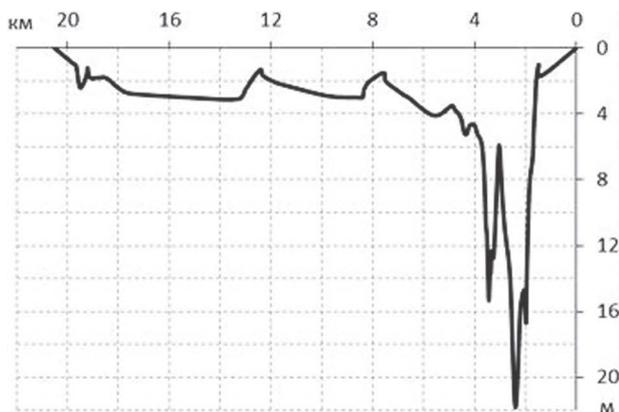


Рис. 7. Продольный профиль котловины оз. Ярато 2-е (по линии А – В на рис. 6)

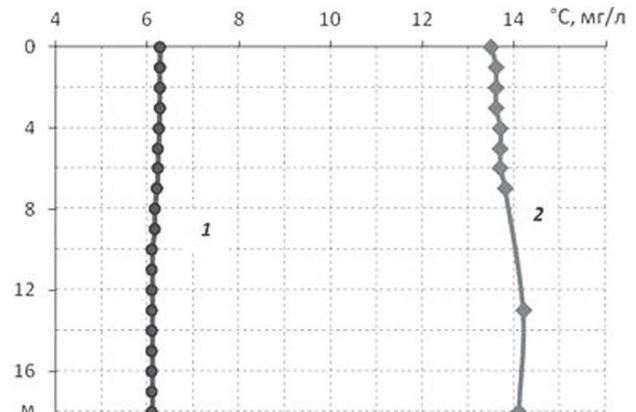


Рис. 8. Вертикальное распределение температуры (1) и O₂ (2) в озере Ярато 2-е

Таблица 3. Данные полевого зондирования водных масс в Яратинских озерах (поверхностный слой, 15–16 сентября 2007 г.)

Озеро	Температура, °С	Насыщение кислородом, %	Электропроводность, мкСм/см
Ярато 1-е	6,2	125	10
Ярато 2-е	6,2	109	10
Б/н (Малое)	5,0	117	<10

Зондирование озера на 18-метровой вертикали дало результаты, близкие к описанным выше для Нейтинских озер. Вся толща озерной воды была хорошо перемешана вследствие активного воздействия ветра и конвекции (даже в «глубоководной» воронке). Температура воды была близка к 6 °С (рис. 8; табл. 3), то есть оказалась ниже, чем в более северных Нейтинских озерах. Скорее всего, это объясняется повышенной интенсивностью выхолаживания водных масс в озере Ярато 2-е из-за его относительной мелководности (см. табл. 1). Электропроводность воды в озере была около 10 мкСм/см (табл. 3), что соответствует минерализации ультрапресной воды. Вода была немного пересыщена кислородом, что, вероятнее всего, свидетельствует о достаточно высокой интенсивности фотосинтеза фитопланктона летом, до начала осеннего выхолаживания водной толщи. При этом обнаружена небольшая обратная стратификация растворенного кислорода (так называемая ортоградная кривая O₂), свойственная холодным олиготрофным озерам [Хатчинсон, 1969].

По сообщениям местных жителей, водоем зимой полностью замерзает, при этом толщина льда достигает 2 м, а снежного покрова на его поверхности – 1 м¹. Очищение озера ото льда завершается в начале июля. Летом (в период активного снеготаяния) вода поднимается до 1,0 м.

Из озера вытекает р. Левый Юрибей – приток р. Юрибей, впадающей в Карское море (рис. 1). Это наиболее значительная река всего полуострова, которая, по нашему опыту, даже осенью на всем своем протяжении достаточно глубока для беспрепятственного прохода моторной лодки². В сентябре 2007 г. ширина реки в истоке составляла 90 м, максимальная глубина – 1,1 м, расход воды – 27,3 м³/с. По сообщениям местных жителей, в районе своего истока река замерзает только после Нового

года. Скорее всего, это свидетельствует о достаточно высокой температуре вытекающей из озера воды.

Озеро Ярато 1-е (67°55' с. ш., 71°35' в. д.) – крупнейшее по площади акватории озеро Ямала (табл. 1). Ухудшение погодных условий помешало нам промерить глубины и провести зондирование на открытой части его акватории. На литорали озера нами была отобрана проба воды, а также проведены измерения характеристик воды. В результате оказалось, что температура, электропроводность и содержание растворенного кислорода воды в поверхностном слое оз. Ярато 1-е были такими же, как и в озере Ярато 2-е (табл. 3).

Из оз. Ярато 1-е вытекает р. Правый Юрибей. По сведениям местных жителей, опрошенных Б. М. Житковым [1913, с. 148], эта река мелководнее Левого Юрибея.

Озеро без названия (Малое; 67°57'27" с. ш., 71°19'58" в. д.). Находится между озерами Ярато 2-е и Ярато 1-е, представляет собой бессточный водоем блюдцеобразной формы. Длина и ширина озера – 0,7 и 0,5 км соответственно; площадь акватории – около 268 тыс. м², средняя и максимальная глубина – 0,9 и 3,2 м соответственно; объем воды – 0,244 млн м³. Вода в озере отличается особенно малой электропроводностью – около 5 мкСм/см (табл. 3). Температура воды в нем была закономерно ниже, чем в более крупных озерах, а насыщение кислородом, как и во всех прочих обследованных нами водоемах, превышало 100 % (табл. 3).

Химический состав озерных вод

Пробы воды отбирались в поверхностном слое озер в пластиковые канистры. Сразу же после возвращения экспедиции в Салехард они были сданы в лабораторию Центра гигиены и эпидемиологии ЯНАО для химического анализа. Лабораторные анализы проводились в соответствии с методиками, принятыми в службе государственного санитарно-эпидемиологического надзора. Полученные результаты представлены в таблице 4.

¹ В монографии Б. М. Житкова сообщается о том, что в конце периода ледостава, в мае 1908 г., толщина льда на озере составляла около 2,1 м [Житков, 1913, с. 31].

² Об этом же свидетельствует любопытный факт, приведенный Б. М. Житковым. Он сообщал, что в оз. Ярато 2-е из Карского моря нередко заходили такие крупные морские млекопитающие, как белухи [Там же, с. 148].

Таблица 4. Характеристики концентрации веществ в воде обследованных озер (мг/дм³)

Характеристики	Нейто 1-е	Нейто-Ерто	Нейто-Малто	Б/н (Водораздельное)	Ямбуто	Ярато 1-е	Б/н (Малое)	Ярато 2-е
Единицы рН	6,3	6,5	6,2	5,7	6,4	6,2	5,8	4,8
Взвеси	24	24	21	24	23	14	16	17
Сухой остаток	66	62	58	<50,0	62	<50,0	<50,0	66
Хлорид ион	6,92	16,85	8,22	1,79	23,76	2,21	1,24	3,17
Сульфат ион	0,85	6,35	2,02	0,98	7,56	1,53	0,51	1,42
Фосфат ион/по Р	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Нитрат ион/по N	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	2,29/0,52
Аммоний ион/по N	0,10/0,08	0,10/0,08	0,74/0,57	0,81/0,63	0,10/0,08	0,16/0,12	0,30/0,23	0,15/0,12
Кальций ион	2,78	4,33	4,31	1,18	9,21	4,7	3,24	1,04
Магний ион	<1,00	3,46	3,31	<1,00	2,8	1,16	<1,00	<1,00
Стронций ион	1,74	1,38	1,29	<1,00	1,39	<1,00	1,16	<1,00
Калий ион	1,09	2,59	2,61	-	4,62	1,21	4,98	0,66
Натрий ион	2,28	2,39	2,28	2,31	4,31	2,32	4,79	1,22
Нефтепродукты	0,23	0,23	0,21	0,22	0,52	0,09	0,05	0,16
Фенолы	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Жесткость общ.	0,18	0,27	0,24	0,12	0,39	0,12	0,1	0,14
Гидрокарбонат	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0
Железо общее	0,13	0,36	0,58	0,44	0,2	0,29	0,41	0,14
Медь	0,07	0,067	0,062	0,063	0,061	0,061	0,079	0,064
Свинец	0,018	0,039	0,026	0,034	0,047	0,019	0,041	0,02
Цинк	0,034	0,137	0,047	0,089	0,105	<0,01	0,111	<0,01
Марганец	<0,01	<0,01	0,049	<0,01	0,016	<0,01	<0,01	<0,01
Кобальт	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Никель	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,013	<0,01
Хром	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ванадий	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Висмут	0,014	0,022	0,016	0,016	0,023	0,02	0,022	0,022

Примечание. Величина рН определена приблизительно из-за длительного хранения проб.

Все обследованные озера в конце летне-осенней межени содержали ультрапресную воду с минерализацией менее 70 мг/л (табл. 4). При этом величина минерализации озерных вод различалась довольно значительно – от <23 в озере Ярато 2-е до <46 и <63 мг/л в озерах Нейто-Ерто и Ямбуто. Гидрохимическая фация солевого состава озер тоже была неоднородной – от $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{Na}$ в Ярато 1-е до $\text{Cl} > \text{Ca} > \text{SO}_4$ в Ямбуто и $\text{Cl} > \text{Na} > \text{Ca}$ в озере на перешейке.

Неоднородность химического состава озерных вод на Ямале отражает общую закономерность, выявленную при обобщении сведений об озерах России и мира, – химия озер азональна, поскольку она определяется тремя азональными факторами: структурой водного баланса данного озера, химическим составом вод, которыми оно питается, а также происхождением и возрастом этого водоема [Эдельштейн, 2014, с. 285]. В тех случаях, когда озера находятся в сходных гидроклиматических условиях, первый фактор становится решающим. Например,

в Большеземельской тундре на европейской территории России находятся тысячи озер площадью от 1 га до 20 км² и более, большинство из которых объединены в три озерно-речные системы – Харбейские, Вашуткины, Падимейские [Голдина, 1972]. Среди этих водоемов, так же как и на Ямале, преобладают термокарстовые озера. Для них характерен большой разброс величин удельного водосбора (φ от 2 до 170) и глубины (от 1 до 40 м). Как следствие, в них различаются соотношение количества атмосферных осадков и вод поверхностного стока в приходной части водного баланса, а также интенсивность внешнего и внутреннего водообмена. Поэтому по структуре водного баланса эти водоемы относятся к трем различным типам стоковых озер. А некоторые из них вообще не имеют стока. Озера с $\varphi > 4$ являются стоково-приточными (СП_3 и СП_4).

Подобная воднобалансовая закономерность прослеживается и в гидрохимических особенностях даже крупнейших тундровых озер

Ямала. Минимальна минерализация в глухих озерах, лежащих на поверхности водораздела и практически не имеющих водосбора, следовательно, питающихся только чистыми атмосферными водами, содержащими преимущественно хлоридно-натриевые океанические аэрозоли в малых концентрациях (6–9 мг/л) [Петренчук, 1979]. Таковы глухое озерко на перешейке ($\Sigma\text{и} < 24$ мг/л, фацция $\text{Cl} > \text{Na} > \text{Ca}$), бесприточные периодически сточное Ярато 1-е ($\Sigma\text{и} < 29$, $\text{HCO}_3 > \text{Na} > \text{Cl}$) и сточное Ярато 2-е ($\Sigma\text{и} < 23$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{Na}$). С увеличением площади водосбора и проточности в водном балансе увеличивается вклад водного притока и вымываемых им из грунтов водосбора гидрокарбонатных и кальциевых ионов, повышается минерализация, что и наблюдается в системе Нейтинских озер – от глубокого Нейто 1-е ($\Sigma\text{и} 34$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{Ca}$) к мелководному Нейто-Малто ($\Sigma\text{и} 52$ мг/л той же фацции).

По данным гидрохимических анализов, содержание биогенных веществ во всех пробах было невелико – N-NH_4 и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ не более 0,60 мг/л (табл. 4), $\text{P-PO}_4 < 0,20$ мг/л; $\text{N-NO}_3 < 0,10$ мг/л; $\text{Mn} 0,01\text{--}0,05$ мг/л, а фенолов $< 0,002$ мг/л.

Заключение

Обследование гидролого-гидрохимического состояния крупнейших озер Ямала в конце летне-осенней межени 2007 г. показало следующее:

1. Котловины озер представляют собой морфологически сложные объекты, состоящие из блюдцеобразной чаши с врезанными в ее дно конусообразными криптодепрессионными впадинами.
2. Среди больших озер Ямала есть как мелководные водоемы со средней глубиной менее 3,0 м (озера Ярато 2-е и Нейто-Малто), так и озера с довольно большой глубиной, в среднем превышающей 10–20 м (Нейто 1-е и Ямбуто).
3. Максимальная измеренная глубина в больших озерах Ямала достигает 63,7 м (оз. Ямбуто).
4. В период осеннего охлаждения во всех озерах вся толща воды была хорошо перемешана благодаря активному воздействию ветра и конвекции (в том числе в небольших по диаметру, но глубоководных впадинах).
5. Зеленоватая окраска воды в некоторых из обследованных озер и ее умеренное пересыщение кислородом во всех водоемах свидетельствуют о значительном развитии холодолюбивых видов фитопланктона (в За-

полярье в вегетационный период этому способствует большая продолжительность светового дня).

6. Во всех обследованных озерах вода имела крайне низкую минерализацию и очень малое содержание гидрокарбонатных ионов, что объясняется подавляющим преобладанием атмосферных осадков в приходной части водного баланса этих водоемов.

В условиях почти полного отсутствия информации о крупных озерах Ямала сведения, представленные в настоящей статье, имеют гидрографо-лимнологическую ценность. Но для более детальной характеристики этих объектов требуется не их разовое посещение, а режимные наблюдения или серия экспедиций.

Авторы выражают свою искреннюю признательность А. В. Дунюшину, Л. Ю. Мачу и Г. А. Ржаницыну за активную и самоотверженную работу в экспедиции, а также к. г. н. М. А. Самохину за помощь при камеральной обработке результатов. Полевые работы выполнялись при технической поддержке ООО «Гидроэкология-КГС».

Литература

- Алабян А. М., Дунюшин А. В., Попрядухин А. А. Оценка водных ресурсов системы озер Нейто и Ямбуто (Центральный Ямал) // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы III общерос. конф. изыскательских организаций. М., 2008. С. 148–152.
- Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири // Под ред. С. М. Новикова. СПб.: ВВМ, 2009. 536 с.
- Голдина Л. П. География озер Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 102 с.
- Доманицкий А. П., Дубровина Р. Г., Исаева А. И. Реки и озера Советского Союза (справочные данные). Л.: Гидрометеиздат, 1971. 104 с.
- Житков Б. М. Полуостров Ямал. Записки Импер. РГО., т. 49. СПб, 1913. 397 с.
- Петренчук О. П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 264 с.
- Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
- Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
- Эрозионные процессы центрального Ямала / Под ред. А. Ю. Сидорчука и А. В. Баранова. СПб.: РНИИ культур. и природ. наследия, 1999. 350 с.
- Ямало-Гыданская область (физико-географическая характеристика). ААНИИ / Под ред. к. г. н. Р. К. Сиско. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 132 с.

Поступила в редакцию 21.01.2017

References

Alabyan A. M., Dunyushin A. V., Popryadukhin A. A. Otsenka vodnykh resursov sistemy ozer Neito i Yambuto (Tsentral'nyi Yamal) [Assessment of the water resources of the Neito and Yambuto lakes system (the central Yamal)]. Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii: materialy III obshcheros. konf. izyskatel'skikh organizatsii [Prospects of Engineering Surveys for Construction in the Russian Federation: Proceed. of the III All-Russ. Conf. of Surveying Companies]. Moscow, 2008. P. 148–152.

Gidrologiya zabolochennykh territorii zony mnogoletnei merzloty Zapadnoi Sibiri [Hydrology of the permafrost zone wetlands in Western Siberia]. Ed. S. M. Novikova. St. Petersburg: VVM, 2009. 536 p.

Goldina L. P. Geografiya ozer Bol'shezemel'skoi tundry [Geography of the lakes of Bolshezemel'skaya tundra]. Leningrad: Nauka, 1972. 102 p.

Domanitskii A. P., Dubrovina R. G., Isaeva A. I. Reki i ozera Sovetskogo Soyuza (spravochnye dannye) [Rivers and lakes of the Soviet Union (reference data)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 104 p.

Zhitkov B. M. Poluostrov Yamal [The Yamal Peninsula]. *Zapiski Imper. RGO*. T. 49 [Proceed. of the Imper. RGS. Vol. 49]. St. Petersburg, 1913. 397 p.

Petrenchuk O. P. Eksperimental'nye issledovaniya atmosfernogo aerolya [Experimental study of atmospheric aerosol]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 264 p.

Hutchinson G. Limnologiya [Limnology]. Moscow: Progress, 1969. 592 p.

Edel'shtein K. K. Gidrologiya ozer i vodokhranilishch. Uchebnik dlya vuzov [Hydrology of lakes and reservoirs: manual for universities]. Moscow: Pero, 2014. 399 p.

Eroziionnye protsessy tsentral'nogo Yamala [Erosion processes in the central Yamal]. Eds. A. Yu. Sidorchuk, A. V. Baranov. St. Petersburg: RNIi kul'turnogo i prirodnogo nasledija, 1999. 350 p.

Yamalo-Gydanskaya oblast' (fiziko-geograficheskaya kharakteristika) [The Yamal and Gydan area (physical and geographical description)]. AANII [Arctic and Antarctic Res. Inst.]. Ed. R. K. Sisko. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 132 p.

Received January 21, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Эдельштейн Константин Константинович

профессор кафедры гидрологии суши географического факультета, д. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991 эл. почта: emek05@mail.ru тел.: (495) 9395470, 89160534552

Алабян Андрей Михайлович

доцент кафедры гидрологии суши географического факультета, к. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991 эл. почта: Andrei_alabyan@mail.ru тел.: 89104506328

Горин Сергей Львович

ведущий научный сотрудник, к. г. н. Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии ул. Верхняя Красносельская, 17, Москва, Россия, 107140 эл. почта: gorinser@mail.ru тел.: 89163170488

Попрядухин Артем Александрович

инженер кафедры гидрологии суши географического факультета Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991 эл. почта: gidroartem@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Edelstein, Konstantin

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: emek05@mail.ru
tel.: (495) 9395470, +79160534552

Alabyan, Andrei

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: Andrei_alabyan@mail.ru
tel.: +79104506328

Gorin, Sergei

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography
17 V. Krasnoselskaya St., 107140 Moscow, Russia
e-mail: gorinser@mail.ru
tel.: +79163170488

Popryadukhin, Artem

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: gidroartem@mail.ru

УДК 556.55:546.21:551.583

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ «НЕОБЫЧНОЙ» ВЕСНЫ НА РЕЖИМ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

**А. Ю. Тержевик¹, С. Д. Голосов^{1,2}, Г. Г. Гавриленко¹,
Р. Э. Здоровеннов¹, Г. Э. Здоровеннова¹, С. Ю. Волков¹,
Н. И. Пальшин¹, Т. В. Ефремова¹, С. Р. Богданов¹**

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

² Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург

Рассмотрены особенности влияния синоптических условий поздней зимы и весны на режим перемешивания полимиктического озера в период открытой воды. Совместный анализ метеорологической информации и данных полевых измерений температуры и содержания растворенного кислорода в небольшом мелководном озере Вендюрском позволил изучить влияние погодных условий «необычной» весны 2016 г., когда озеро вышло из-под льда устойчиво стратифицированным, на особенности формирования теплового и газового режимов его водной толщи и придонных слоев в летний период. Оценка атмосферного воздействия на озеро с привлечением масштаба длины Монина – Обухова позволила определить предельные значения скоростей ветра и величины кинематического потока тепла на поверхности, необходимые для полного перемешивания его водной толщи. Серия численных экспериментов на одномерной параметрической модели FLake показала, что при определенных погодных условиях (теплая весна, длительная подледная конвекция, жаркая маловетренная погода после взлома льда) озеро теряет период весеннего перемешивания до дна, выходя из-под льда уже устойчиво стратифицированным. Результаты расчетов на модели показали, что отсутствие полного весеннего перемешивания после взлома льда может негативно сказаться на газовом режиме мелководного озера в летний период. При теплой маловетренной погоде в мае–июне продолжительность непрерывного существования придонной аноксии в локальных углублениях может превышать 7–8 месяцев.

Ключевые слова: мелководное озеро; синоптические условия; глубина перемешивания; температура воды; растворенный кислород.

**A. Yu. Terzhevik, S. D. Golosov, G. G. Gavrilenko, R. E. Zdrovennov,
G. E. Zdrovennova, S. Yu. Volkov, N. I. Palshin, T. V. Efremova,
S. R. Bogdanov. THE POSSIBLE EFFECT OF AN UNUSUAL SPRING ON
THE DISSOLVED OXYGEN IN A SHALLOW LAKE DURING THE SUMMER**

The article examines the impact of 'late' winter and spring synoptic conditions on the mixing regime of a polymictic lake during the open water period. Based on joint analysis of meteorological information and field measurements of the water temperature and dissolved oxygen content, the effect of unusual spring 2016 weather conditions, when the lake was steadily stratified at the ice-off moment, on the formation of the thermal

and gas regimes of the lake's water column and near-bottom layers in the summer was studied. Atmospheric impact evaluation using a modified Monin-Obukhov length scale allows determining the critical values of wind speed and total surface heat flux required for the water column overturn. Series of numerical experiments using one-dimensional FLake model revealed that under certain weather conditions, i. e. warm spring, prolonged under-ice convection, warm and calm weather after ice-off, a lake may lose the spring overturn effect, being stably stratified before ice-off. Model calculations proved that the absence of the spring overturn may negatively affect the lake gas regime during the summer, and in the case of warm, low-wind weather in May and June the duration of bottom anoxia in local depressions may exceed 7–8 months.

Key words: shallow lake; synoptic conditions; depth of mixing; water temperature; dissolved oxygen.

Введение

Эволюция термической структуры водной толщи мелководных непроточных озер определяется теплообменом с атмосферой и донными отложениями, а также перераспределением тепла за счет ветро-волнового перемешивания и плотностных циркуляций. Годовой термический цикл мелководных озер умеренных широт характеризуется отчетливым сезонным ходом, в котором выделяют периоды весенне-летнего нагревания, осенне-зимнего охлаждения и зимнего нагревания [Зайков, 1955]. Весной непосредственно после взлома льда обычно происходит полное перемешивание водной толщи озер, после чего, в зависимости от погодных условий, начинается ее нагревание в состоянии, близком к гомотермии либо слабовыраженной термической стратификации. Под действием радиационного нагревания поверхностных слоев воды в озерах формируется плотностная стратификация, затрудняющая вертикальный перенос тепла, питательных веществ, растворенных газов и взвешенных частиц, при этом в придонных слоях водоема формируется дефицит кислорода. Таким образом, создается резкий контраст между свойствами вод гипolimниона и эпилимниона.

В полимиктических озерах в летний период рост придонных температур и насыщение придонных слоев кислородом происходят при периодических перемешиваниях водной толщи на фоне ветрового воздействия, приводящего к заглублению и разрушению сезонного термоклина [Гавриленко и др., 2014]. В димиктических озерах, в которых полное перемешивание водной толщи происходит лишь дважды в год (весной после освобождения ото льда и в период осеннего охлаждения), летняя температура и газовый режим гипolimниона определяются продолжительностью и интенсивностью весеннего перемешивания [Arvola et al., 2010].

Продолжительность весеннего перемешивания может заметно варьировать от года к году в зависимости от синоптических условий. Данные наблюдений показывают, что на небольших лесных озерах и ламбах период весеннего перемешивания может полностью отсутствовать в связи с тем, что озера выходят из-под льда уже устойчиво стратифицированными; подобная ситуация «весенней меромиксии» фиксировалась на озере Валкеа-Котинен в Финляндии [Arvola et al., 2010]. Данные численного моделирования демонстрируют, что на фоне меняющегося климата в режиме перемешивания озер могут произойти серьезные изменения вплоть до перехода полимиктических водоемов в разряд димиктических, а димиктических – в разряд моно- и даже меромиктических [Kirillin, 2010].

В случае исчезновения из годового цикла озер периода весеннего перемешивания до дна возможны значительные сдвиги в функционировании их экосистем, поскольку именно в этот период происходит активное накопление тепла донными отложениями, разрушение «зимних» придонных анаэробных зон, насыщение кислородом придонных слоев водной толщи, вынос в поверхностные слои биогенных элементов, необходимых для активного цветения планктона. Целью данной работы было изучение влияния нетипичных синоптических условий поздней зимы и весны на термический и газовый режимы мелководного озера в летний период.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований было выбрано мелководное мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное на юге Карелии (62°10'–62°20'N, 33°10'–33°20'E). Площадь зеркала озера составляет 10,4 км², объем вод ~ 5,5·10⁷ м³, средняя глубина 5,3 м, максимальная – 13,4 м, площадь водосборного бассейна

82,8 км². Котловина озера имеет ледниковое происхождение и простирается с запада на восток. Объем речного стока невелик. Определяющее значение в динамике озерных вод в течение года принадлежит стоку с водосбора и атмосферным осадкам (20–25 %). Прозрачность воды по диску Секки достигает 3–3,5 м. Донные отложения представлены песками в мелководных районах и илами в глубоководной части озера (около 60 % площади дна) [Литинская, Поляков, 1975].

Район, в котором расположен объект исследований, характеризуется умеренно-континентальным климатом с чертами морского, которому свойственны продолжительная мягкая зима и короткое прохладное лето. Территория юга Карелии характеризуется преобладанием атлантических и арктических воздушных масс в течение года [Назарова, 2014]. В весенне-летний период, ввиду активной циклонической деятельности, погода неустойчива, часто наблюдаются резкие понижения температуры, усиления ветра, продолжительные похолодания. В регионе отмечается заметная межгодовая изменчивость синоптических условий, что отражается на термическом режиме мелководных водоемов в летний период [Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015].

Начиная с 2007 года и до настоящего времени сотрудниками лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН проводятся круглогодичные наблюдения за температурой воды и содержанием растворенного кислорода (РК) в центральной глубоководной части оз. Вендюрского [Тержевик и др., 2010; Здоровеннов и др., 2011; Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015; Здоровеннова и др., 2016]. При измерениях используется автономная станция – коса, оснащенная температурными и кислородными датчиками производства компании RBR Ltd. (Канада); глубина в месте постановки станции измерений 11,1–11,3 м. Датчики располагаются на косе через 0,5–1,5 м в водной толще и через 2–5 см в придонных слоях. Верхний датчик располагается на глубине 2–2,5 м. Технические характеристики датчиков приведены в работах [Здоровеннов и др., 2011; Гавриленко и др., 2014]. Коса находится в озере круглогодично, кроме нескольких дней весной и осенью, когда она изымается для замены батарей и снятия данных. Временной интервал измерений составляет одну минуту. Анализ атмосферного воздействия на озеро осуществляется с использованием данных метеостанции Петрозаводск (www.rp5.ru), а также глобальных моделей ре-анализа ERA Interim и NCEP/NCAR

Reanalysis 2 (<http://apps.ecmwf.int>, <https://www.esrl.noaa.gov/>).

Оз. Вендюрское может быть отнесено к классу полимиктических водоемов, поскольку в период открытой воды его водная толща неоднократно полностью перемешивается [Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015]. Окончание периода ледостава на оз. Вендюрском обычно происходит в первой декаде мая [Zdorovenov et al., 2013], после чего на протяжении 1–4 суток происходит очищение акватории от остатков льда, в ходе которого водная толща озера активно перемешивается, при этом температура и содержание РК по вертикали выравниваются [Здоровеннова и др., 2014]. В разные годы в зависимости от погодных условий весенняя гомотермия продолжается от нескольких дней до трех недель. Весной 2016 г. озеро вышло из-под льда устойчиво стратифицированным, потеряв период весенней гомотермии [Гавриленко и др., 2017]. Такое явление наблюдалось впервые за десятилетний период измерений на фоне длительной подледной конвекции и теплой маловетреной погоды после взлома льда. Начиная с середины зимы в придонных слоях центральной котловины озера Вендюрского формируется анаэробная зона, толщина которой к концу ледостава достигает метра [Тержевик и др., 2010]. После взлома льда на этапе весеннего перемешивания анаэробная зона разрушается, и придонные слои водной массы насыщаются кислородом. Летом, в зависимости от погодных условий, определяющих условия перемешивания водной толщи, в придонных слоях центральной котловины формируется дефицит кислорода. Толщина анаэробной зоны обычно не превышает одного метра, а продолжительность летней аноксии – не более двух-трех недель [Zdorovenova et al., 2016]. При неблагоприятных погодных условиях аномально жаркого лета 2010 г. продолжительность аноксии превысила 1,5 месяца, а максимальная толщина анаэробной зоны достигала 3–4 м [Ефремова и др., 2015].

Нами были проведены оценки внешнего воздействия на озеро, необходимого для полного перемешивания его водной толщи, то есть условий, при которых глубина ветрового воздействия будет превосходить максимальную глубину водоема. Глубина ветрового воздействия для случая устойчивой стратификации водного столба может быть оценена, например, по масштабу длины Монина – Обухова [см. Wüest, Lorke, 2003]:

$$l = \frac{u_*^3}{k_B},$$

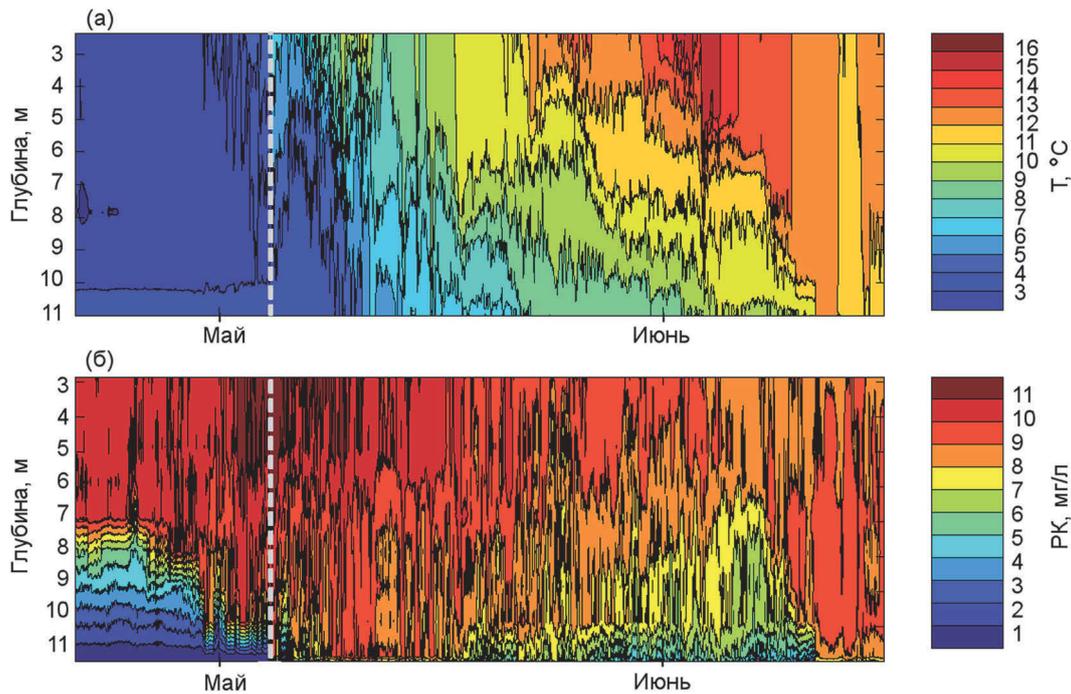


Рис. 1. Температура воды (а) и концентрация РК (б) в центральной части оз. Вендюрского в период с 21 апреля по 16 июня 2016 г. Пунктирная линия – момент взлома льда (по данным косы, см. текст)

где k – постоянная Кармана, равная 0,4; B – вертикальный поток плавучести; u_* – скорость трения, или динамическая скорость. Глубина перемешанного слоя может быть затем оценена как $h_i = 0,2l$. Динамическую скорость можно определить как $u_* = (\tau_w / \rho_e)^{1/2}$, где ρ_e – плотность воды эпилимниона; $\tau_w = C_D \rho_{air} U^2$ – касательное напряжение ветра, ρ_{air} – плотность воздуха, U – скорость ветра. Значения C_D , зависящие от скорости ветра, были получены из работы [Read et al., 2011]: $C_D = 1 \cdot 10^{-3}$ для скорости ветра $U < 5$ м/с; $C_D = 1,5 \cdot 10^{-3}$ для скорости ветра $U \geq 5$ м/с. Вертикальный поток плавучести можно определить как $B = \beta Q$, где $\beta = \alpha g$ – параметр плавучести по температуре, Q – суммарный поток тепла на поверхность, g – ускорение свободного падения, α – коэффициент термического расширения воды [Зилитинкевич, 1989]. Для оценки масштаба h_i были использованы гипотетически возможные в мае в регионе исследований значения кинематического потока тепла Q и скорости ветра в диапазоне $1-10 \cdot 10^{-5}$ К·м/с и 1–10 м/с соответственно.

Для уточнения влияния погодных условий конца зимы и начала лета на термический и кислородный режимы мелководного озера в период открытой воды была проведена серия численных экспериментов на одномерной модели FLake [Mironov et al., 2010; Golosov et al., 2012; см. также <http://lakemodel.net>], основанной на

параметрическом подходе к эволюции температурного и кислородного профилей.

Результаты и обсуждение

Анализ натуральных данных

Весной 2016 года на озере Вендюрском наблюдалась необычная динамика температуры водной толщи после освобождения озера ото льда. Подледная конвекция весной 2016 г. началась уже в середине марта на фоне нетипично теплой зимы (среднемесячная температура февраля и марта в 2016 г. была выше среднегодовой нормы, оцененной для периода 1961–1990 гг., на 7,5 и 3,2 °С соответственно), и к концу апреля глубина перемешанного слоя достигала 8 м, после чего заглубливание его нижней границы прекратилось, но рост температуры продолжился. Так, в период с 25 по 30 апреля температура воды перемешанного слоя увеличилась от 3,2 до 3,8 °С. В первых числах мая температура поверхностных слоев водной толщи превысила 4 °С и продолжала расти, 3 мая в 5-метровом поверхностном слое температура воды достигала 5,5–6 °С. Взлом льда произошел 4 мая, при этом средняя температура водной толщи составляла 4,9 °С. В момент выхода из-под льда в озере наблюдалась устойчивая стратификация, разница температур в поверхностных и придонных слоях в центральной части озера достигала 2,2 °С. На

Отношение максимально возможной глубины перемешивания озера h_i к общей глубине водоема D при заданных значениях скорости ветра U (м/с) и кинематического потока тепла на поверхности Q (К·м/с)

U	Q									
	1×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}	8×10^{-5}	9×10^{-5}	1×10^{-4}
h_i/D										
1	0,0027	0,0013	0,0009	0,0007	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003
2	0,0215	0,0108	0,0072	0,0054	0,0043	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0022
3	0,0725	0,0363	0,0242	0,0181	0,0145	0,0121	0,0104	0,0091	0,0081	0,0073
4	0,1720	0,0860	0,0573	0,0430	0,0344	0,0287	0,0246	0,0215	0,0191	0,0172
5	0,6170	0,3085	0,2057	0,1543	0,1234	0,1028	0,0881	0,0771	0,0686	0,0617
6	1,0662	0,5331	0,3554	0,2665	0,2132	0,1777	0,1523	0,1333	0,1185	0,1066
7	1,6930	0,8465	0,5643	0,4233	0,3386	0,2822	0,2419	0,2116	0,1881	0,1693
8	2,5272	1,2636	0,8424	0,6318	0,5054	0,4212	0,3610	0,3159	0,2808	0,2527
9	3,5983	1,7991	1,1994	0,8996	0,7197	0,5997	0,5140	0,4498	0,3998	0,3598
10	4,9358	2,4679	1,6453	1,2340	0,9872	0,8227	0,7051	0,6170	0,5484	0,4936

протяжении первой недели после взлома льда стратификация усиливалась, и 11 мая разница поверхностной и придонной температур в центре озера достигала 5,5–6 °С. Озеро оставалось в стратифицированном состоянии до первой декады июня, то есть больше месяца после освобождения ото льда, и было полностью перемешано лишь 11–12 июня на фоне продолжительного похолодания и усиления ветра (рис. 1).

У нас нет информации о толщине ледового покрова и его прозрачности в последние дни существования льда, но можно предположить, что необычный рост температуры воды был вызван усилением потока солнечной радиации. Следует также отметить, что наиболее вероятным объяснением отсутствия конвективного перемешивания в придонном слое является повышенное – до 5-кратного по сравнению с остальной частью водного столба – содержание солей в его водах за счет продуктов бактериального разложения органического вещества [см., например, Malm et al., 1997]. Оценки плотности придонной воды с учетом солей для конца подледного периода показали, что она была самой высокой в пределах столба воды.

Концентрация РК на нижних придонных горизонтах измерений в течение последней недели ледостава не превышала 0,25 мг/л, на горизонте 9,9 м достигала 2–2,5 мг/л, на горизонте 8,9 м – 4–5 мг/л. В день взлома льда наблюдался резкий рост концентрации РК на глубоководных горизонтах (до 8–9 мг/л) и ее снижение до значений 2–3 мг/л в течение следующих суток. На горизонте 9,86 м в последние 5 дней ледостава наблюдалась значительная изменчивость концентрации РК – от 3 до 10 мг/л. Через сутки после взлома льда в водной толще наблюдалась заметная вертикальная неоднородность концентраций РК, сохранявшаяся вплоть до июньского перемешивания (рис. 2).

Для понимания природы наблюдавшегося перемешивания мы оценили эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$ кислорода, используя соотношение, связывающее линейный масштаб деформации его вертикального профиля со временем, в течение которого эта деформация осуществлялась [Golosov et al., 2003; см. также Тержевик и др., 2010]:

$$D_{эфф} = \frac{(H-h)^2}{t},$$

где H – глубина, м; h – толщина перемешанного слоя, м; t – длительность рассматриваемого периода, с.

В соответствии с оценками по приведенной формуле значения эффективного коэффициента диффузии РК в метровом придонном слое центральной котловины озера в дневные часы 4 мая достигали $1,9 \cdot 10^{-4}$ – $2,8 \cdot 10^{-4}$ м²/с, что заметно выше коэффициента молекулярной диффузии кислорода в воде ($1,23 \cdot 10^{-9}$ м²/с [Новый справочник..., 2004]). Можно смело предположить, что речь идет не о молекулярной, а о турбулентной диффузии.

В связи с тем, что озеро после взлома льда находилось в стратифицированном состоянии, уже с середины мая 2016 г. наблюдались признаки дефицита кислорода в придонных слоях центральной котловины (рис. 1, б), в то время как в другие годы исследований придонная гипоксия формировалась лишь в середине лета [Zdrovennova et al., 2016].

Формулировка «модельного» сценария

Мы оценили внешнее воздействие на озеро, необходимое для полного перемешивания его водной толщи, то есть условия, при которых глубина ветрового воздействия будет превосходить максимальную глубину водоема.

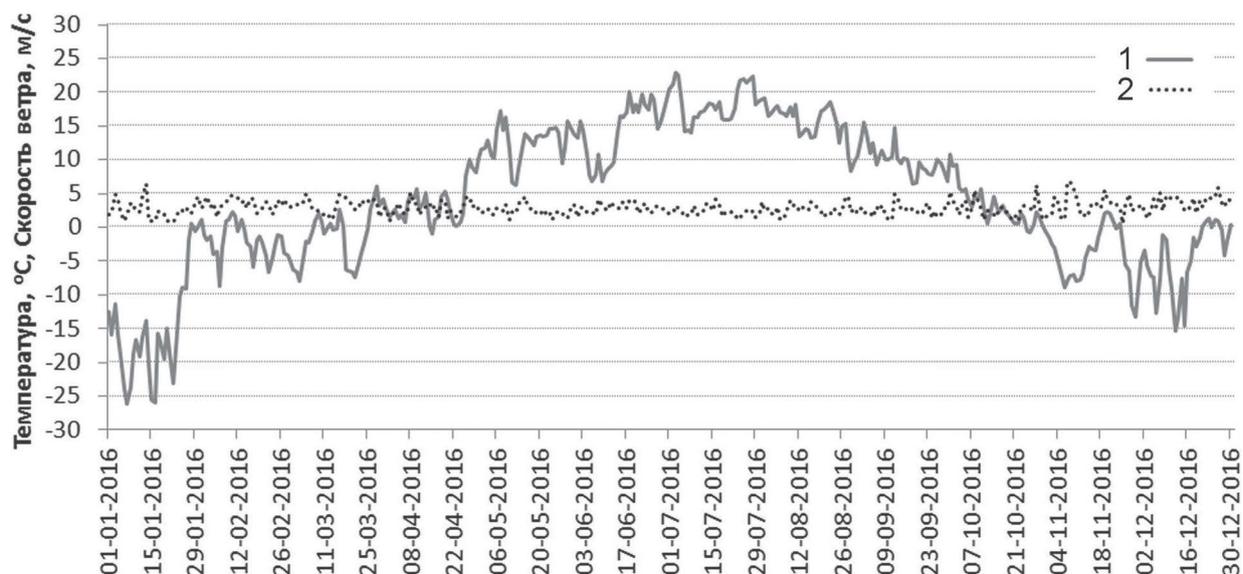


Рис. 2. Среднесуточные значения температуры воздуха (1) и скорости ветра (2) по метеостанции Петрозаводск в 2016 г.

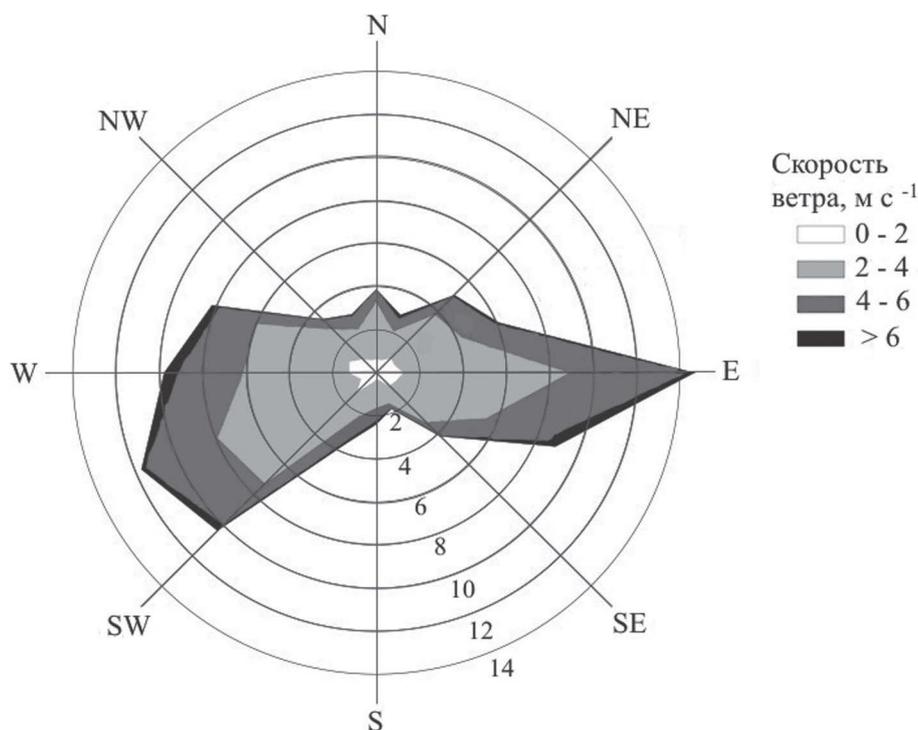


Рис. 3. Повторяемость (%) направлений и скорости ветра в мае на МС Петрозаводск. Диаграмма построена на основании данных срочных наблюдений в 2005–2017 гг. Цифры на графике характеризуют процент повторяемости

В таблице приведены значения отношения h_1 к максимальной глубине водоема D , позволяющие определить, при каких скоростях ветра и величине кинематического потока водоем будет перемешан до дна (значения h_1/D более единицы, заштрихованные ячейки в таблице).

Анализ таблицы позволяет предположить, что при скоростях ветра более 6 м/с и величине потока менее $5 \cdot 10^{-5}$ К·м/с водоем будет

перемешан до дна. Анализ метеоинформации по станции Петрозаводск показал, что в весенне-летние месяцы 2016 г. среднесуточные значения скорости ветра не превышали 5 м/с (рис. 2). Таким образом, условия для полного перемешивания озера за счет ветровой нагрузки были неблагоприятными.

Нетипичная картина выхода водоема из-под льда весной 2016 г. побудила провести

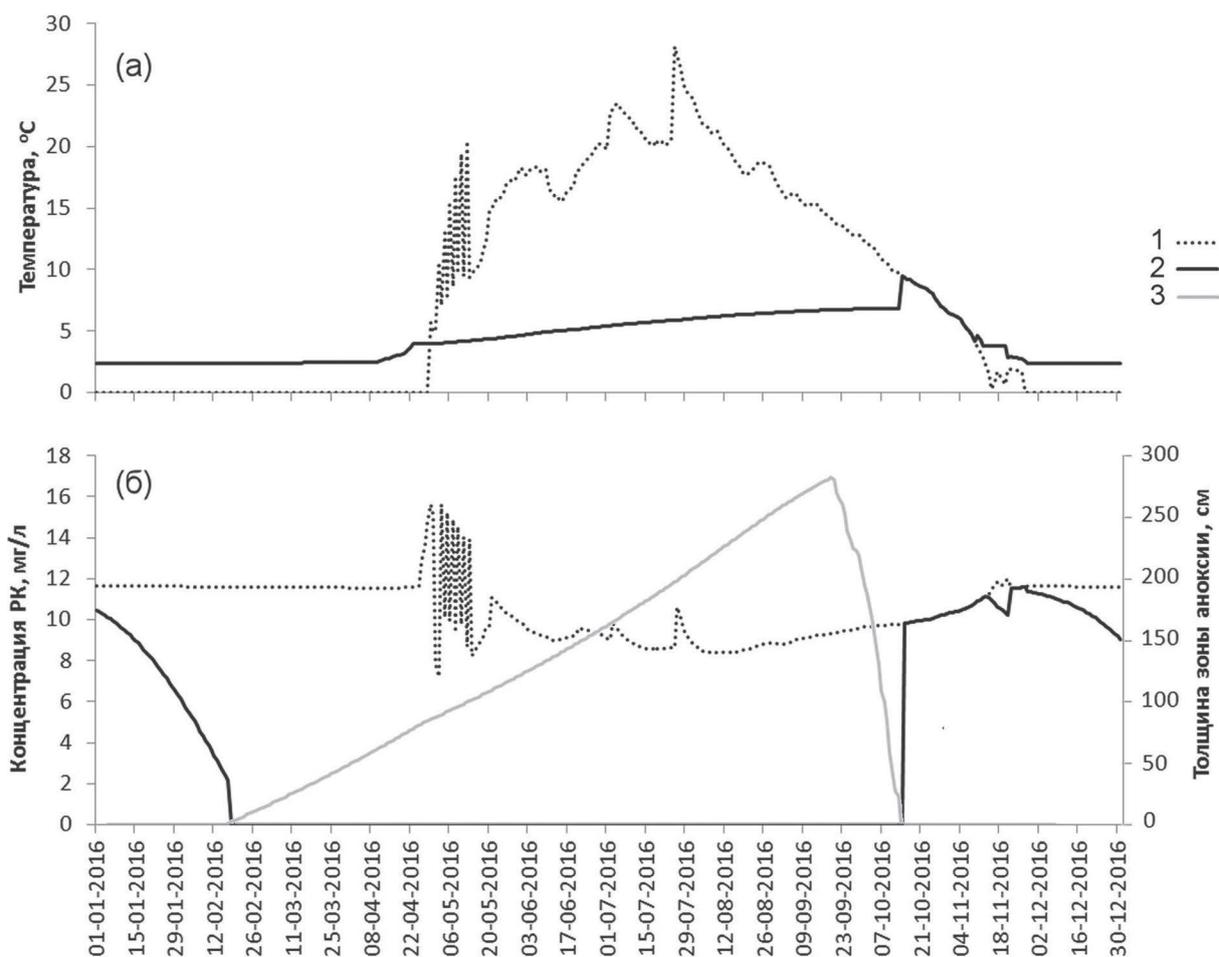


Рис. 4. Температура воды (а) и концентрация растворенного кислорода (б) в поверхностных (1) и придонных (2) слоях оз. Вендюрского, а также толщина зоны анооксии (3). Результаты модельных расчетов с погодными условиями 2016 года со сценарными изменениями в мае

серию численных экспериментов с использованием модели FLake для определения гидрометеорологической ситуации, при которой весеннее перемешивание после взлома льда могло и не произойти. В этом случае возможно формирование и длительное существование острого дефицита РК, включая полную аноксию в придонном слое, когда озеро из состояния зимней стагнации сразу переходит в состояние летней стратификации. Опираясь на полученные масштабные оценки и результаты предшествующих исследований, сформулировали следующий сценарий. При выходе озера из-под льда с вертикальным профилем температуры явно летнего характера достаточно нескольких дней с безоблачной погодой и слабым ветром, чтобы сформировался острый вертикальный градиент плотности в верхнем 1–2-метровом слое водной толщи. При сохранении такой погоды хотя бы в течение одного-двух синоптических периодов сформировавшийся термоклин может стать препятствием

для полного перемешивания озера над локальными углублениями на длительный срок, вплоть до конца лета. Следует отметить, что анализ имеющейся информации о скоростях ветра в мае за период 2005–2017 гг. показал, что вероятность ветров сильнее 5 м/с очень мала – менее 2 % (рис. 3).

В соответствии с модельными расчетами (рис. 4), сразу после выхода озера из-под льда разница поверхностных и придонных температур начинает быстро расти, то есть в озере формируется термическая стратификация, усиливающаяся в течение летних месяцев, и в результате озеро остается в стратифицированном состоянии до начала октября. Концентрация РК в придонном слое в подледный период достигает нулевых значений уже к середине февраля. С этого момента начинает формироваться придонная анаэробная зона, толщина которой к концу ледостава достигает метра. Поскольку весеннее перемешивание после взлома льда отсутствует, насыщения

глубоководных горизонтов кислородом не происходит; в дальнейшем, в условиях ограниченного вертикального перемешивания, аноксия усиливается вплоть до начала осеннего перемешивания (начало октября). Таким образом, продолжительность непрерывной придонной аноксии достигает семи с половиной месяцев. Расчет показал, что толщина бескислородного слоя к моменту разрушения сезонного термоклина превысила 2,5 м.

Заключение

Анализ данных непрерывных круглогодичных полевых измерений температуры и концентраций РК в мелководном полимиктическом озере Вендюрском показал, что на фоне длительной подледной конвекции в озере может сформироваться прямая стратификация уже под ледяным покровом. Подобная ситуация наблюдалась весной 2016 г. После взлома льда на фоне теплой маловетреной погоды стратификация может усилиться так, что озеро потеряет способность к перемешиванию до дна на длительный период. Результаты модельных расчетов на одномерной параметрической модели FLake демонстрируют, что, если погодные условия первых дней и недель открытой воды будут способствовать усилению стратификации (слабый ветер, теплая ясная погода), возможна ситуация, в которой озеро будет оставаться стратифицированным до начала осеннего охлаждения. При этом кислородный режим в озере существенно ухудшится: продолжительность придонной аноксии, сформировавшейся еще в середине зимы, будет достигать семи с половиной месяцев, а толщина придонной анаэробной зоны может превысить 2,5 м, что заметно превосходит наблюдаемые значения.

Литература

Гавриленко Г. Г., Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, вып. 1. С. 414–421.

Гавриленко Г. Г., Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э. Динамика температуры водной толщи мелководного озера на финальном этапе ледостава и после взлома льда // География: развитие науки и образования: Мат. между. науч.-практ. конф. СПб., 2017. С. 134–138.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здравеннова Г. Э., Терзевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67–76.

Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 271 с.

Здравеннов Р. Э., Здравеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 57–63.

Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Гавриленко Г. Г., Терзевик А. Ю. Термический режим мелководного озера после разрушения льда // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей: Труды VIII Междунауч.-практ. конф. М.: РУДН, 2014. С. 390–401.

Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Богданов С. Р., Терзевик А. Ю. Тепловой режим мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Зилитинкевич С. С. Проникающая турбулентная конвекция. Таллинн: Валгус, 1989. 207 с.

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

Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, вып. 1. С. 746–749.

Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / Ред. Г. М. Островский. СПб.: Профессионал, 2004. Ч. 2. 920 с.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здравеннов Р. Э., Здравеннова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Arvola L., George G., Livingstone D. M., Järvinen M., Blenckner T., Dokulil M. T., Jennings E., Aonghusa C. N., Nöges P., Nöges T., Weyhenmeyer G. A. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in The Impact of Climate Change on European Lakes // Aquatic Ecology. Series 4. Ed. by D. G. George. P. 85–101. Springer Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_6

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

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes / A. Terzhevik (ed.), Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, Petrozavodsk, 2003. P. 83–88.

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

Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // Boreal Env. Research. 2010. Vol. 15. P. 279–293.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt

content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure // *Nordic Hydrology*. 1997. Vol. 28. P. 99–128.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observation, scaling and a mixed-layer model // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107, I. C4. P. 7–1–7–16. doi: 10.1029/2001JC00089

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

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Env. Modelling and*

Software. 2011. Vol. 26, no. 11. P. 1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61, no. 1. P. 26–32.

Zdorovennova G., Palshin N., Zdorovenov R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. No. 2. P. 47–57. doi: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

Поступила в редакцию 29.09.2017

References

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Y. Vliyaniye ekstremal'no zharkogo leta 2010 g. na temperaturu vody i raspredelenie kisloroda v ozerakh Karelii [The effects of the extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution in Karelian lakes]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*. 2015. Vol. 40, no. 9. P. 612–618. doi: 10.3103/S106837391509006X

Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Termicheskie i kislorodniye regimy melkovodnogo ozera na etape letnego nagrevaniya [Thermal and oxygen regimes of a shallow lake at the stage of summer heating]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]*. 2014. Vol. 10, iss. 1. P. 414–421.

Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E. Dinamika temperatury vodnoi tolshchi melkovodnogo ozera na final'nom etape ledostava i posle vzloma l'da [Temperature dynamics of the water layer of a shallow lake at the final freeze-up stage and after ice fracturing]. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf. [Geography: Development of Science and Education: Proceed. of the Int. Scientific and Practical Conf.]*. St. Petersburg, 2017. P. 134–138.

Litinskaya K. D., Polyakov Ju. K. Ozera Vendyurskoi gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of the Vendyur group – Uros, Rindozero, and Vendyurskoe]. *Vodnye resursy Karelii i ikh ispol'zovanie [Water Resources of Karelia and their Use]*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1975. P. 57–66.

Nazarova L. E. Klimat Respubliki Kareliya (Rossiya): temperatura vozdukh, izmenchivost' i izmeneniya [The climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]*. 2014. Vol. 10, iss. 1. P. 746–749.

Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii [A new guide for chemists and technologists. Processes and instruments of chemical engineering]. Ed. G. M. Ostrovskii. St. Petersburg: Professional, 2004. Part. 2. 920 p.

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Gidrofizicheskie aspekty formirovaniya kislorodnogo rezhima melkovodnogo ozera, pokrytogo l'dom [Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2010. Vol. 37, no. 5. P. 662–673. doi: 10.1134/S0097807810050064

Zaikov B. D. Ocherki po ozerovedeniyu [Studies on limnology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1955. 271 p.

Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E., Palshin N. I., Terzhevik A. Yu. Izmenchivost' termicheskogo i kislorodnogo rezhimov melkovodnogo ozera zimoi [Variability of thermal and oxygen regimes of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2011. No. 4. P. 57–63.

Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Termicheskiy rezhim melkovodnogo ozera posle razrusheniya l'da [Thermal regime of a shallow lake after ice fracturing]. *Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei: Trudy VIII mezhd. nauch.-prakt. konf. [Dynamics and Thermics of Rivers, Reservoirs, and Sea Coastal Areas: Proceed. of VIII Int. Scientific and Practical Conf.]* Moscow: RUDN, 2014. P. 390–401.

Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu. Teplovoi rezhim melkovodnogo ozera zimoi [Thermal regime of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2016. No. 5. P. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Zilitinkevich S. S. Pronikayushchaya turbulentsnaya konveksiya [Turbulent penetrative convection]. Tallinn: Valgus, 1989. 207 p.

Arvola L., George G., Livingstone D. M., Järvinen M., Blenckner T., Dokulil M. T., Jennings E., Aonghusa C. N., Nöges P., Nöges T., Weyhenmeyer G. A. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology. Series 4*. Ed. by D. G. George. P. 85–101. Springer Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_6

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

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes. Ed. A. Terzhevik. Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Petrozavodsk, 2003. P. 83–88.

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

Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Env. Research*. 2010. Vol. 15. P. 279–293.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinisky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure. *Nordic Hydrology*. 1997. Vol. 28. P. 99–128.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observation, scaling and a mixed-layer model. *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107, I. C4. P. 7–1–7–16. doi: 10.1029/2001JC00089

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

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Env. Modelling and Software*. 2011. Vol. 26, no. 11. P. 1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech*. 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220

Zdorovenнов R., Palshin N., Zdorovenнова G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61, no. 1. P. 26–32.

Zdorovenнова G., Palshin N., Zdorovenнов R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. No. 2. P. 47–57. doi: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

Received September 29, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Терзhevik Аркадий Юрьевич

ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ark1948@list.ru
тел.: +79217267356

Голосов Сергей Дмитриевич

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. ф.-м. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

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

Гавриленко Галина Геннадиевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: south.sun.cr@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru

Golosov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com

Здоровеннов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: +79212209438

Здоровеннова Галина Эдуардовна

и. о. заведующего лаб. гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: +79116660369

Волков Сергей Юрьевич

и. о. младшего научного сотрудника, аспирант
лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: taranarmo@gmail.com

Пальшин Николай Иннокентьевич

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

Ефремова Татьяна Владимировна

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Богданов Сергей Рэмович

ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: sergey.r.bogdanov@mail.ru

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: +79212209438

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: +79116660369

Volkov, Sergey

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

Palshin, Nikolai

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

Efremova, Tatyana

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

Bogdanov, Sergey

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

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 550.47

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В ПРЕСНОВОДНОМ ОЗЕРЕ СВЯТОЕ

**К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева,
Е. А. Вахрамеева**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН
им. Н. П. Лаверова, Архангельск*

В работе представлены результаты исследований состояния пресноводного озера Святое (Коношский район Архангельской области) на основании данных по распределению соединений серы в воде и донных отложениях на мелководном участке акватории и в глубоководной зоне. Выявлен участок воздействия хозяйственно-бытовой деятельности населения на водоем, а также тенденции по изменению состояния водного объекта.

Ключевые слова: восстановление сульфатов; органическое вещество; природные воды; донные отложения; озеро Святое; Архангельская область.

**K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva, E. A. Vahrameeva.
DISTRIBUTION OF SULFUR COMPOUNDS AS A RESULT OF THE SULFATE
REDUCTION PROCESS IN FRESHWATER LAKE SVYATOE**

The results of investigations of the state of the freshwater Lake Svyatoye (Konoshsky District of the Arkhangelsk Region) based on data on the distribution of sulfur compounds in the water and sediments in the shallow- and deep-water parts of the lake are presented. The area affected by human activities and the tendencies for change in the condition of the lake were revealed.

Keywords: sulfate reduction; organic matter; natural water; bottom sediments; Lake Svyatoye; Arkhangelsk Region.

Введение

Одним из распространенных элементов в земной коре и в гидросфере является сера.

Источником ее соединений в водных объектах суши служат поверхностный сток и подземные воды. Соединения серы поступают в них как в ходе естественных природных процессов,

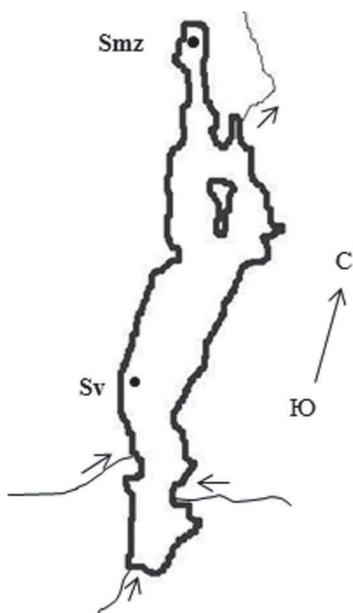
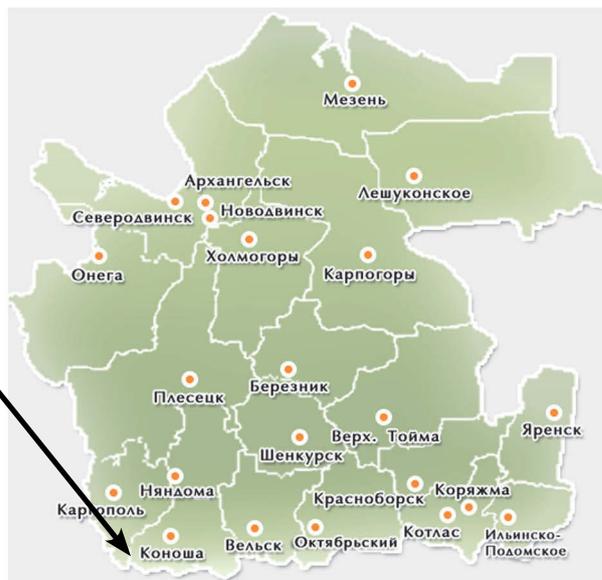
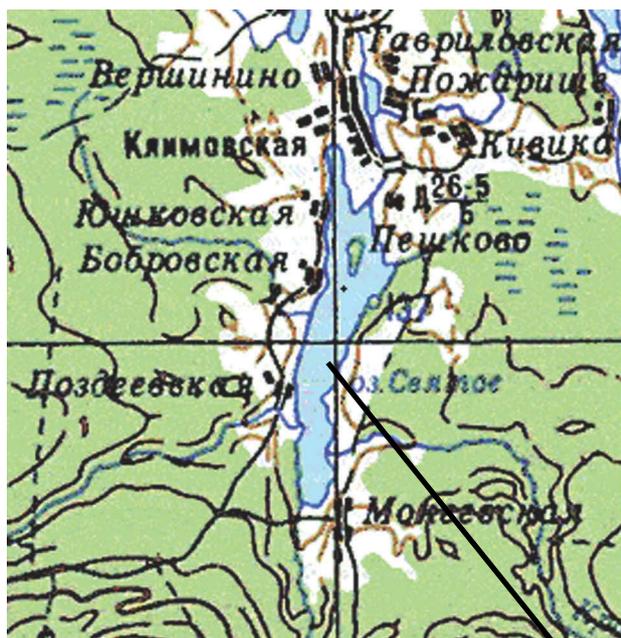


Рис. 1. Расположение оз. Святое и станций отбора проб

так и в результате антропогенного влияния. Наиболее термодинамически устойчивой формой серы являются сульфаты. Хотя концентрации сульфатов в пресных водоемах могут быть низкими, круговорот серы как в пространстве, так и во времени сильно влияет на многие биогеохимические процессы [Holmer, Stockholm, 2001]. Часто водоемы подвергаются антропогенному воздействию, которое не ограничивается только увеличением содержания сульфатов в воде и ее подкислением. В ряде случаев наблюдается комбинированное загрязнение водоемов сернистыми соединениями и органическими веществами, а также азотом и фосфором, что приводит к активизации

цепочки биологических процессов, приводящих к эвтрофированию водоемов, а также при дефиците кислорода, распаде органических веществ (ОВ) – к образованию сероводорода за счет активизации деятельности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) в возникших анаэробных условиях [Глобальный..., 1983]. Образование сероводорода, за исключением процессов гниения, является результатом протекания сульфатредукции, в основе которой лежит окислительно-восстановительная реакция окисления органических веществ СРБ за счет сопряженного восстановления сульфатов [Иванов, 1979]. Наличие H_2S в придонных слоях водного объекта обычно служит показателем

присутствия большого количества ОВ, признаком острого дефицита кислорода и наличия заморных явлений. Высокая токсичность H_2S и специфичный запах, который резко ухудшает органолептические свойства воды, делают ее непригодной для питьевого водоснабжения и других хозяйственных целей [РД..., 2010].

Донные отложения (ДО) являются неотъемлемой частью водоема, находятся в постоянном взаимодействии с водной толщей; в них накапливаются и трансформируются различные элементы, которые при изменении условий в водоеме могут выступать источниками вторичного загрязнения. Изучение содержания таких элементов в донных отложениях весьма важно не только для выяснения внутриводоемных процессов, но и для решения практических вопросов, например, выявления участков антропогенного воздействия на водоем.

Основными лимитирующими факторами развития СРБ в пресных водоемах являются наличие сульфатов, низкомолекулярных органических соединений, нейтральная реакция среды, а также восстановительные условия среды [Волков, 1984; Намсараев и др., 1995]. Объектами исследования, отвечающими подобным условиям, могут выступать малые озера, которые в основной своей массе остаются малоизученными.

Целью данной работы являлось изучение протекания в зимний период процесса сульфатредукции по распределению соединений восстановленной серы – производных сероводорода и сульфатов в воде и донных отложениях оз. Святое на его мелководной станции, для которой ранее отмечалось возникновение заморных явлений, и для сравнения – на мелководном участке водоема.

Материалы и методы

Озеро Святое – наиболее крупное в Ротковской системе. Длина его достигает 4,30 км, наибольшая ширина – 0,93 км, площадь водного зеркала 2,11 км². Дно неоднородное: при средней глубине водоема 3,6 м его центральная часть мелководна, здесь отмечен максимум глубин 16 м – станция Sv (N60.83708, E039.50888), а северная часть мелководна – станция Smz (N60.86018; E039.51455) – глубина 4 м [Климов и др., 2008] (рис. 1). Береговая линия сильно изрезана. Приток вод в водоем осуществляется посредством нескольких речушек (ручьев) в южной части озера. Из водоема берет свое начало речка Святица.

По берегам водоема располагаются существующие или в настоящее время заброшенные деревни Климовская, Поповка, Поздеевская, Мокеевская, Юшковская и др., объединенные в МО Климовское. До недавнего времени на севере озера функционировал маслозавод, стоки которого без очистки поступали в водоем.

Пробы воды отбирались в соответствии с ГОСТ Р 51592–2000 [2001] послойно на выбранных станциях с помощью горизонтального пластикового батометра. Вода помещалась в емкости из стекла согласно требованиям хранения. Ввиду отсутствия возможности незамедлительного выполнения аналитических работ по установлению концентраций сероводорода пробы консервировались путем предварительного добавления ацетата цинка [ГОСТ..., 2001].

Донные осадки были отобраны согласно требованиям ГОСТ 17.1.5.01–80 [1980б] в мелководной части озера и в северной относительно мелководной его части. Послойное разделение отобранных ударной грунтовой трубкой осадков проводилось с дискретностью 5 см.

Определение **сероводорода и сульфидов** выполнялось фотометрическим методом. Он основан на реакции сульфид-ионов в кислой среде с N,N'-диметил-p-фенилендиамином с образованием промежуточного серусодержащего соединения, которое переходит в лейкоформу, а затем окисляется (окислитель – Fe^{3+}) до окрашенной формы метиленового синего [РД..., 2010].

Определение **сульфатов в воде** осуществлялось хроматографически на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором [ПНД..., 2008]. Идентификацию сульфатов проводили по времени удерживания, количественное определение – по площадям пиков методом абсолютной калибровки. Полученные результаты обрабатывали с помощью программы LC Solution.

Определение различных **форм серы в донных отложениях** проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Волков, Жабина, 1980]. Методика предусматривает определение сульфидной, элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески донных осадков.

Определение **общего и органического углерода в донных отложениях** осуществляли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на C,H,N-анализаторе фирмы Hewlett-Packard.

Определение **гранулометрического состава донных осадков** проводили в соответствии с ГОСТ 12536–79 [1980а].

Определение **прокаленного остатка (ППП) донных осадков** выполнено в соответствии с [Heiri et al., 2001]. Метод определения прокаленного остатка основан на прокаливании полученного остатка при температуре 550 ± 20 °С и его взвешивании. Предварительно пробу высушивают при температуре 105 ± 2 °С до постоянной массы.

Определение содержания **гуминовых веществ** проводили после извлечения их из высушенного и тонко растертого осадка 0,5% раствором NaOH [Методы..., 1980]. Количество гуминовых веществ оценивалось по содержанию органического углерода (дихроматное окисление со спектрофотометрическим окончанием).

Результаты и обсуждение

Озеро Святое является мезотрофным [Shirokova et al., 2013] со средним удельным водосбором, равным 59; по показателю (коэффициенту) условного водообмена ($4,6 \text{ год}^{-1}$) относится к водоемам со средним водообменом [Климов и др., 2008]. В ионном составе озерной воды преобладают Ca^{2+} и HCO_3^- , поэтому воды озера относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы [Климов, 2008; Кокрятская и др., 2012], pH изменяется от 7,9 до 6,6 [Кокрятская и др., 2012]. В зимний период (март) воды содержали кислород по всей толще, в придонных слоях концентрация растворенного кислорода составляла 1–2 мг/л [Shirokova et al., 2013] и менее 1 мг/л. В результате ветрового перемешивания в летний период (июль) вода по всей толще насыщена кислородом [Кокрятская и др., 2012].

Содержание растворенного органического углерода (РОУ) изменялось от 15 до 20 мг/л для мелководной станции; отмечено устойчивое снижение (на 20–30 %) его концентрации книзу в зимний период и довольно постоянное вертикальное распределение в летнее время [Shirokova et al., 2013], как и для глубоководной станции в зимний период (20–22 мг/л). Концентрация HCO_3^- увеличивалась от поверхности до дна в среднем в 1,2 раза для обеих станций. Для северной мелководной части озера отмечено влияние стоков действовавшего до 2010 года маслозавода и деревень на его берегу – по периодической минимальной деструкции ОВ при высокой продукции [Широкова и др., 2008], заметному содержанию (до 7 КОЕ/мл) представителей бактерий группы кишечной палочки в период весеннего половодья

[Широкова, Добродеева, 2006]; значительному возрастанию количества фосфатов в придонном слое воды в зимний период [Кокрятская и др., 2012].

Среднее содержание H_2S в воде мелководной станции оз. Святое в зимний период наблюдений 2008–2009 годов составляло 8,9 мг/л и изменялось в интервале от 3,3 до 13,4 мг/л, для глубоководной – 7,0 мг/л, с интервалом от 2,4 до 15,7 мг/л. К 2016 году среднее содержание H_2S снизилось в 1,5 раза (по сравнению с 2008–2009 годами) для обеих станций, изменяясь в интервале от 3,1 до 8,6 мг/л. Содержание сульфатов, как и ранее, у дна в среднем составляло 9,6 мг/л. Снижается содержание РОУ от поверхности водоема ко дну на 30 % (до 20 мг/л в пересчете на органический углерод). Кислородом был насыщен только поверхностный метровый горизонт, к придонному слою его содержание падало практически до нуля. Таким образом, условия среды, необходимые для жизнедеятельности СРБ (анаэробная зона, pH, наличие ОВ и сульфатов), имели место, а сульфатредукция в воде протекала вяло.

Как известно, в течение вегетационного сезона экологические условия в водоемах меняются – для рассматриваемого в работе димиктического оз. Святое меженные периоды – зимний (март) и летний (июль) – характеризуются стагнацией воды, истощением кислорода в гипolimнионе и накоплением восстановленных продуктов. В донных отложениях создаются анаэробные условия (для мелководной станции возможны аэробно-анаэробные), в которых СРБ могут активизировать свою деятельность.

В результате протекания процесса сульфатредукции образуется ряд соединений восстановленной серы – продукты трансформации бактериального сероводорода, куда входят кислоторастворимые сульфиды (S^{2-}), элементная (S^0) и пиритная сера ($\text{S}_{\text{пирит}}$), также сера в составе органических соединений ($\text{S}_{\text{орг}}$) [Остроумов, 1953]. Помимо распределения содержания указанных форм серы в работе будет также оценено количество сульфатов в жидкой и твердой фазах донных отложений.

Работы по изучению сульфатредукции в донных отложениях оз. Святого были начаты ранее, результаты этих исследований представлены в ряде публикаций [Кокрятская и др., 2012; Титова, Кокрятская, 2013, 2014]. Было установлено, что анаэробный процесс сульфатредукции протекает в донных отложениях оз. Святое начиная с их поверхностных горизонтов (до 10 см), что характерно для отложений большинства пресноводных водоемов

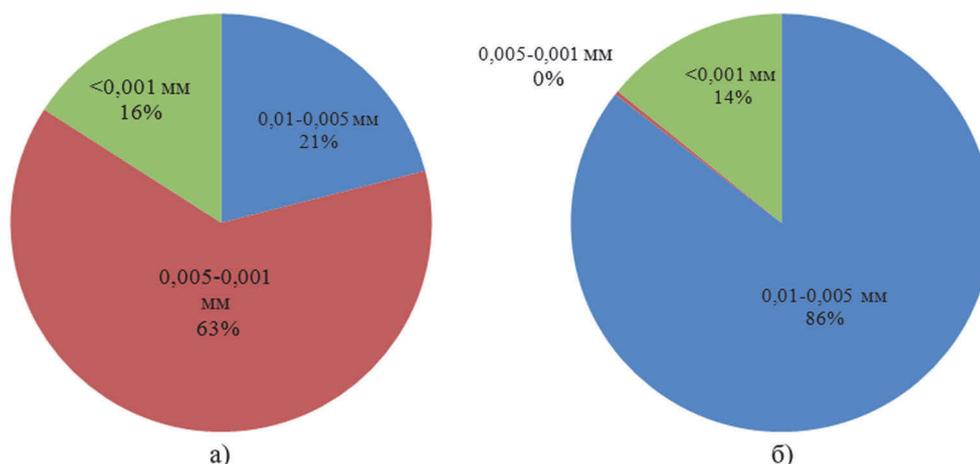


Рис. 2. Распределение фракций в составе пелитов поверхностного горизонта донных отложений мелководной (а) и глубоководной (б) станций оз. Святое

[Кузнецов, 1952; Urban et al., 1994; Намсараев и др., 1995; Li et al., 1996; Holmer, Storkholm, 2001]. Однако более явно он выражен в толще осадков (глубина более 25 см). Это подтверждается количественными данными распределения форм серы – доминирующей среди сульфидных форм здесь является пиритная (до 1%) [Титова, Кокрятская, 2014], а также данными микробиологических исследований по численности СРБ и интенсивности сульфатредукции [Забелина и др., 2012; Кокрятская и др., 2012].

Контролирующими факторами протекания сульфатредукции в поверхностном слое донных отложений являются содержание сульфатов (акцептор электронов) в иловых водах и органического вещества (донор электронов) [Глобальный..., 1983; Волков, 1984]. Исследователями установлено, что сульфатредукция в пресноводных отложениях с концентрациями сульфатов до 100 мкМ ограничена прежде всего наличием доступных для СРБ доноров электронов [Holmer, Storkholm, 2001], а в ДО оз. Святого концентрация сульфатов в жидкой фазе в среднем более 2000 мкМ. Вследствие чего лимитирующим сульфатредукцию фактором для отложений оз. Святое будет выступать количественный и качественный состав ОВ.

Донные отложения, отобранные для настоящего исследования и проанализированные ранее [Титова, Кокрятская, 2014], визуально были однотипны. Влажность поверхностного слоя отложений составляла в среднем за все годы исследования $88,03 \pm 1,90$ %. Отобранные осадки представлены в основном пелитовой фракцией. Для мелководной станции Smz в зимний период содержание этой фракции составляло 93,21 % (в расчете на сухой осадок), преобладающей была фракция 0,005–0,001 мм (63 % от количества пелитовой фракции),

далее фракция размером 0,01–0,005 мм (21 %) (рис. 2, а). Количество алевритовой фракции – 5,82 %. Для глубоководной станции Sv пелитовая фракция составляла 98,08 %, преобладающей была фракция 0,01–0,005 мм (86 %), далее < 0,001 мм – 14 % (рис. 2, б); алевритовая фракция – всего 1,51 %.

По результатам ранее проведенных исследований содержание органического углерода в поверхностном горизонте ДО глубоководной станции составляло 8,39 % (здесь и далее в расчете на сухой осадок), что сопоставимо с данными для мелководного участка.

В настоящее время содержание органического углерода в ДО для мелководной станции несколько увеличилось и составило в среднем 9,40 %, в то время как для глубоководной оно снизилось в среднем до 6,90 %. Потери при прокаливании составляют 19,70 и 21,49 % для мелководной и глубоководной станций соответственно. Таким образом, содержание ОВ еще в целом значительно – более 6 % (это органическое вещество названо в работе остаточным, то есть не израсходованным в процессах аэробной и анаэробной минерализации ОВ после его поступления в водоем). Следовательно, количественное содержание органического вещества не должно выступать в роли лимитирующего процесс сульфатредукции фактора.

Значения С/Н в поверхностном слое ДО мелководной станции для зимней межени (март) составляли 9, для летней (июль) – 8; для глубоководной – 9 (март) и 7 (июль). Для поверхностных слоев воды озера в растворенном ОВ в марте были отмечены высокие значения отношения С/Н (до 62), но в придонных водах оно снижается до 12; в июле – от 33 до 20 соответственно [Shirokova et al., 2013]. Подобные

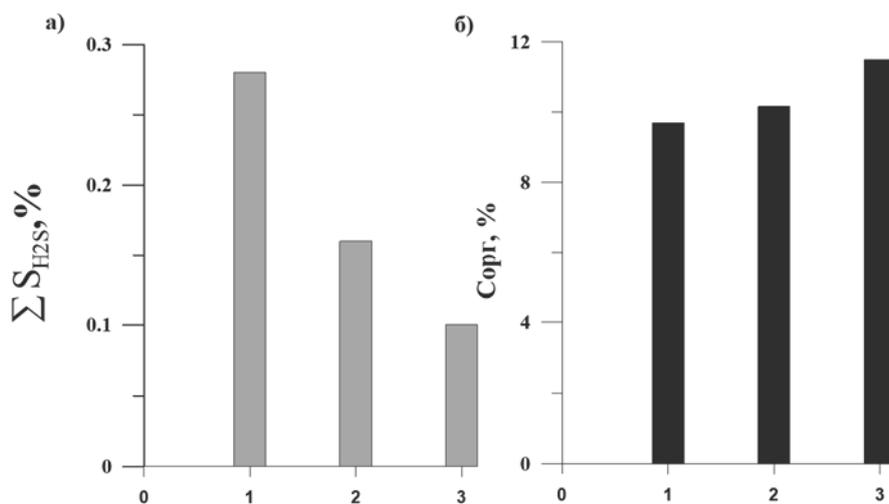


Рис. 3. Изменение содержания соединений восстановленной серы (а) и остаточного органического углерода (б) в поверхностном слое донных отложений мелководного участка в 2009 (1), 2014 (2) и 2013 (3) годах

соотношения говорят не только о поступлении аллохтонных веществ с водосбора, но и о частичной трансформации ОВ в водной толще.

В 2013 году в зимний период были зафиксированы за весь период исследований наиболее высокие значения этого показателя в донных отложениях как для мелководной станции – 11, так и для глубоководной – 24, при том, что для летней межени (июль) они были небольшими – в среднем 6 и 7 соответственно. В настоящее время значения отношения С/Н в поверхностном слое ДО обеих станций для зимней межени в среднем немного снизились.

Содержание гуминовых веществ как одних из наиболее трудноминерализуемых извлекаемых органических соединений составляло около 33 % от общего содержания ОВ для мелководной станции, около 56 % для глубоководной.

По результатам ранее выполненных исследований содержание соединений восстановленной серы ($\Sigma\text{SH}_2\text{S}$) в поверхностном горизонте донных отложений на мелководной станции озера составляло в зимний период 0,38 % (здесь и далее в расчете на сухой осадок). Доминирующей формой являлась органическая, составляющая до 92 % от общего содержания соединений восстановленной серы. Количество сульфатной серы составляло 0,24 %. В это же время для донных отложений глубоководной станции оз. Святое Sv содержание соединений восстановленной серы составляло 0,23 %; количество сульфатной серы – 0,14 %.

В настоящее время содержание соединений восстановленной серы в поверхностном слое осадков на обоих участках озера сокращается для зимнего периода в среднем в 1,5–2 раза за счет снижения количества всех ее форм.

Содержание сульфидных форм серы (кислорастворимых сульфидов и пирита) в донных отложениях мелководной станции Smz было изначально небольшим и еще несколько снизилось в настоящее время с 0,04 до 0,01–0,02 %. Количество элементной серы также было низким (максимально до 0,05 %) и в настоящее время уменьшилось до 0,01 %. Содержание органической формы снижается в 1,5–2 раза, но остается еще довольно значительным. Преобладающим источником поступления органической серы в донные отложения может являться отмирание водной растительности и поверхностный сток. Известно, что содержание общей серы в водных растениях может быть различно и изменяться от 0,24 до 4,99 % в расчете на сухое вещество [Волков, 1984].

Для мелководного участка водоема отмечена обратная связь между содержанием органической формы серы и органического углерода – чем меньше $\text{C}_{\text{орг}}$, тем больше количество $\text{S}_{\text{орг}}$. Данная тенденция изменения в содержании остаточного органического углерода согласуется с колебаниями расхода ОВ на восстановление сульфатов (рис. 3), но следует иметь в виду, что увеличение остаточного количества органического вещества связано и со снижением расхода его на другие анаэробные процессы.

Невысокое содержание всех форм восстановленной серы, скорее всего, свидетельствует о низкой активности сульфатредукции в поверхностном горизонте донных отложений оз. Святое, несмотря на достаточное количество сульфатов в жидкой фазе отложений. Вялость протекания этого процесса как одного из терминальных анаэробных процессов минерализации ОВ связано с нехваткой доступного для

гетеротрофных анаэробных бактерий органического вещества (доноров электронов), так как для их жизнедеятельности необходимы низкомолекулярные карбоновые кислоты и спирты, простейшие сахара [Беляев и др., 1981; Волков, 1984], которые не успевают образоваться в аэробной зоне водной толщи из-за незначительной глубины озера на этом участке.

Заключение

На мелководной станции оз. Святое в зимний период создаются благоприятные условия среды, необходимые для жизнедеятельности СРБ (анаэробный гипополимнион, рН, наличие достаточного количества ОВ и сульфатов), но при этом отмечается незначительная активность протекания процесса сульфатредукции как в водной толще озера, так и в поверхностном слое донных отложений.

Вялость протекания этого процесса как одного из терминальных анаэробных процессов минерализации ОВ связано, скорее всего, с нехваткой доступных для гетеротрофных анаэробных бактерий низкомолекулярных органических соединений, которые не успевают образоваться в результате минерализации органического вещества в аэробной зоне водной толщи, а продуцирование этих соединений затруднено из-за цветности воды.

Влияние хозяйственно-бытовой деятельности населения сказывается в поступлении дополнительного количества ОВ и затратах кислорода на его окисление. На относительно мелководном участке водоема, испытывающем влияние прибрежных деревень и ранее функционировавшего здесь маслозавода, в зимний период сульфатредукция протекала немного активнее, чем на отдаленном глубоководном участке, – общее содержание соединений восстановленной серы в ДО, по значению которого косвенно можно судить об интенсивности протекания сульфатредукции, составляло в среднем 0,38 и 0,23 % (в расчете на сухой осадок) соответственно. К настоящему времени отмечено снижение содержания сероводорода в водной толще и его производных в поверхностном горизонте отложений в среднем в 1,5–2 раза по сравнению с периодом исследований 2008–2009 годов.

Авторы выражают благодарность рецензенту П. А. Лозовику за внимательное прочтение рукописи и ценные рекомендации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект мол_а № 16-35-00025) и ФАНО (№ 0410-2014-0026).

Литература

- Беляев С. С., Леин А. Ю., Иванов М. В. Роль метанообразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // *Геохимия*. 1981. № 3. С. 437–445.
- Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // *Химический анализ морских осадков*. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
- Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека / Под ред. акад. Г. К. Скрябина. М.: Наука, 1983. 424 с.
- ГОСТ 12536–79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Межгосударственный стандарт. М.: ИПК Изд-во стандартов СССР, 1980а. 15 с.
- ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов СССР, 1980б. 5 с.
- ГОСТ Р 51592–2000. Вода. Общие требования к отбору проб. М., 2001. 48 с.
- Забелина С. А., Кокрятская Н. М., Широкова Л. С., Покровский О. С., Саввичев А. С., Воробьева Т. Я., Чупаков А. В., Климов С. И. Анаэробные процессы деструкции органического вещества в озерах Архангельской области // *Материалы всерос. симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах»* (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 193–196.
- Иванов М. В. Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий // *Химия океана. Геохимия донных осадков*. М.: Наука, 1979. Т. 2. С. 327–339.
- Климов С. И., Широкова Л. С., Забелина С. А., Воробьева Т. Я., Морева О. Ю. Особенности формирования термической структуры озер Ротковецкой группы // *Современные проблемы науки и образования*. 2008. № 3. С. 9–14.
- Кокрятская Н. М., Забелина С. А., Саввичев А. С., Морева О. Ю., Воробьева Т. Я. Сезонные биогеохимические и микробиологические исследования малых озер таежной зоны Северо-Запада России (Архангельская область) // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 1. С. 78–91.
- Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. М.: АН СССР, 1952. 300 с.
- Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. 343 с.
- Намсараев Б. Б., Дулов Л. Е., Земская Т. И., Карабанов Е. Б. Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках озера Байкал // *Микробиология*. 1995. Т. 64, № 3. С. 405–410.
- Остроумов Э. А. О формах соединений серы в отложениях Черного моря // *Тр. Ин-та океанологии АН СССР*. 1953. Т. 7. С. 70–90.

ПНД Ф 14.1:2:4.132–98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. М., 2008. 21 с.

РД 52.24.450–2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N'-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в воде и донных осадках малых озер юго-запада Архангельской области // Вестник Московского гос. обл. университета. 2013. № 2. С. 101–105.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Сульфатредукция в донных отложениях озера Святое (юг Архангельской области) // Вестник Иркутского гос. тех. университета. 2014. № 1 (84). С. 52–56.

Широкова Л. С., Добродеева Л. К. Роль бактериопланктона в процессах самоочищения Ротковецких озер (Коношский район) // Вестник Поморского университета. 2006. № 1 (9). С. 115–122.

Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Морева О. Ю., Климов С. И. Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // Современные

проблемы науки и образования, 2008. № 5. С. 11–17.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // Journal of Paleolimnology. 2001. Vol. 25. P. 101–110.

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // Freshwater Biology. 2001. Vol. 46, iss. 4. P. 431–451.

Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan // Hydrobiologia. 1996. Vol. 33. P. 201–208.

Shirokova L. S., Pokrovsky O. S., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Vorobieva T. Ya. Decrease of concentration and colloidal fraction of organic carbon and trace elements in response to the anomalously hot summer 2010 in a humic boreal lake // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 463–464. P. 78–90.

Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39 (4). P. 797–815.

Поступила в редакцию 13.10.2016

References

Belyaev S. S., Lein A. Yu., Ivanov M. V. Rol' metanoobrazuyushchikh i sul'fatredutsiruyushchikh bakterii v protsessakh destruktсии organicheskogo veshchestva [The role of methane-producing and sulfate-reducing bacteria in the processes of organic matter degradation]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 1981. No. 3. P. 437–445.

Global'nyi biogeokhimicheskii tsikl sery i vliyanie na nego deyatel'nosti cheloveka [The global biogeochemical cycle of sulfur and human impact on it]. Ed. by acad. G. K. Skryabin. Moscow: Nauka, 1983. 424 p.

GOST 12536–79. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. Mezghosudarstvennyi standart [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Interstate standard]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov SSSR, 1980a. 15 p.

GOST 17.1.5.01–80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost' [Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis]. Moscow: Izd-vo standartov SSSR, 1980b. 5 p.

GOST R 51592–2000. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Water. General requirements for sampling]. Moscow, 2001. 48 p.

Ivanov M. V. Geokhimicheskaya deyatel'nost' sul'fatredutsiruyushchikh bakterii [Geochemical activity of sulfate-reducing bacteria]. *Khimiya okeana. Geokhimiya donnykh osadkov [Ocean Chemistry. Geochemistry of Bottom Sediments]*. Moscow: Nauka, 1979. Vol. 2. P. 327–339.

Klimov S. I., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Vorob'eva T. Ya., Moreva O. Yu. Osobennosti formirovaniya termicheskoi struktury ozer Rotkovetskoj gruppy [Features of thermal structure formation of Rotkovets lakes]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Sci. and Educ.]*. 2008. No. 3. P. 9–14.

Kokryatskaya N. M., Zabelina S. A., Savichev A. S., Moreva O. Yu., Vorob'eva T. Ya. Sezonnye biogeokhimicheskie i mikrobiologicheskie issledovaniya malyykh ozer taezhnoi zony Severo-Zapada Rossii (Arkhangelskaya oblast') [Seasonal biogeochemical and microbiological studies of small lakes in the taiga zone of the northwestern Russia (Arkhangelsk Oblast)]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2012. Vol. 39, no. 1. P. 78–91.

Kuznetsov S. I. Rol' mikroorganizmov v krugovorote veshchestv v ozerakh [The role of microorganisms in circulation of substances in lakes]. Moscow: Akademiya nauk SSSR, 1952. 300 p.

Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva v okeane [Methods for studying organic matter in the ocean]. Moscow: Nauka, 1980. 343 p.

Namsaraev B. B., Dulov L. E., Zemskaya T. I., Karabanov E. B. Geokhimicheskaya deyatel'nost' sul'fatredutsiruyushchikh bakterii v donnykh osadkach ozera Baikal [Geochemical activity of sulfate-reducing bacteria in bottom sediments of Lake Baikal]. *Mikrobiologiya [Microbiology]*. 1995. Vol. 64, no. 3. P. 405–410.

Ostroumov E. A. O formakh soedinenii sery v otlozheniyakh Chernogo morya [On the forms of sulfur compounds in the sediments of the Black Sea]. *Tr. In-ta okeanologii AN SSSR [Proceed. of the Inst. of Oceanology, Acad. of Sci. of the USSR]*. 1953. Vol. 7. P. 70–90.

PND F 14. 1:2:4. 132–98. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi kontsentratsii anionov: nitrita, nitrata, khlorida, florida, sul'fata i fosfata v probakh prirodnoi pit'evoi i stochnoi vody metodom ionnoi khromatografii [A procedure for measuring mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate, and phosphate in samples of natural drinking and waste water using the method of ion chromatography]. Moscow, 2008. 21 p.

RD 52.24.450–2010. Massovaya kontsentratsiya serovodoroda i sul'fidov v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom s N,N'-dimetil-n-fenilendiaminom [Mass concentration of hydrogen sulphide and sulphide in water. A measuring procedure using the photometric method with N, N-dimethyl-n-phenylenediamine]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2010. 50 p.

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Soedineniya sery v vode i donnykh osadkakh malykh ozer yugo-zapada Arkhangel'skoi oblasti [Sulfur compounds in water and bottom sediments of the small lakes in the southwest of Arkhangel'sk Oblast]. *Vestnik Moskovskogo gos. oblast. univ. [Bull. of the MSRU]*. 2013. No. 2. P. 101–105.

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sul'fatreduktsiya v donnykh otlozheniyakh ozera Svyatoye (yug Arkhangel'skoi oblasti) [Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Svyatoye (the south of Arkhangel'sk Oblast)]. *Vestnik Irkutskogo gos. tekhn. univ. [Bull. of the Irkutsk St. Tech. Univ.]*. 2014. No. 1 (84). P. 52–56.

Shirokova L. S., Dobrodeeva L. K. Rol' bakterio-planktona v protsessakh samoochishcheniya Rotkovetskikh ozer (Konoshskii raion) [The role of bacterial plankton in self-purification processes of Rotkovets lakes (Konoshsky district)]. *Vestnik Pomorskogo univ. [Bull. of the Pomor St. Univ.]*. 2006. No. 1 (9). P. 115–122.

Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Kharakteristika produktsionno-destruktsionnykh protsessov malykh ozer Arkhangel'skoi oblasti [Description of production/destruction processes in small lakes of Arkhangel'sk Oblast]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. 2008. No. 5. P. 11–17.

Volkov I. I. Geokhimiya sery v osadkakh okeana [Sulfur geochemistry in ocean sediments]. Moscow: Nauka, 1984. 272 p.

Volkov I. I., Zhabina N. N. Metody opredeleniya razlichnykh soedinenii sery v morskikh osadkakh [Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments]. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov [Chemical Analysis of Marine Sediments]*. Moscow: Nauka, 1980. P. 5–27.

Zabelina S. A., Kokryatskaya N. M., Shirokova L. S., Pokrovskii O. S., Savvichev A. S., Vorob'eva T. Ya., Chupakov A. V., Klimov S. I. Anaerobnye protsessy destrukttsii organicheskogo veshchestva v ozerakh Arkhangel'skoi oblasti [Anaerobic processes of organic substance destruction in the lakes of Arkhangel'sk Oblast]. Materialy vseros. simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem "Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh" (Petrozavodsk, 10–14 sentyabrya 2012 g.) [Proceed. of the All-Russian Symposium with the Int. Part. "Organic Substance and Biogenic Elements in Inland Waters and Seas" (Petrozavodsk, September 10–14, 2012)]. Petrozavodsk, 2012. P. 193–196.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. 2001. Vol. 25. P. 101–110.

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology*. 2001. Vol. 46, iss. 4. P. 431–451.

Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 33. P. 201–208.

Shirokova L. S., Pokrovskiy O. S., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Vorobieva T. Ya. Decrease of concentration and colloidal fraction of organic carbon and trace elements in response to the anomalously hot summer 2010 in a humic boreal lake. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 463–464. P. 78–90.

Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* 1994. Vol. 39 (4). P. 797–815.

Received October 13, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного
изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

заведующая лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного
изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: nkokr@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangel'sk, Russia
e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Kokryatskaya, Natalya

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangel'sk, Russia
e-mail: nkokr@yandex.ru

Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: ostrivok.vi_nt@mail.ru

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: vakhr-elena@yandex.ru

Zhibareva, Tatyana

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangelsk, Russia
e-mail: ostrivok.vi_nt@mail.ru

Vakhrameeva, Elena

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangelsk, Russia
e-mail: vakhr-elena@yandex.ru

УДК 556.5

ДИНАМИКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ТРАНСГРАНИЧНОГО ЧУДСКОГО ОЗЕРА

Ю. А. Фетисова, Г. Т. Фрумин

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Разработана методика оценки качества вод трансграничных водных объектов сопредельных государств, базирующаяся на расчете химического индекса и классификации качества воды. В методику включается измерение ряда химических параметров в пробах воды с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде химического индекса CJ , который характеризует обобщенное качество воды. Для каждого параметра определяется его относительный вес W . Этот вес может рассматриваться как приоритетность каждого параметра. Затем для каждого параметра определяется значение подындкса q с помощью оцифрованных градуировочных графиков. Химический индекс загрязненности воды CJ является мультипликативной функцией подындксов q в степени, равной относительному весу каждого параметра W . Также разработана классификационная система оценки загрязненности трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня». Число классов качества вод принято равным пяти. На основе разработанной методики выявлена динамика качества вод трансграничного Чудского озера с 2000 по 2015 г. Установлено, что за этот период вода Чудского озера в целом по водоему характеризуется как слабозагрязненная (2-й класс качества). Химический индекс CJ варьировал от минимального значения 89,9 в 2003 г. до максимального 96,8 в 2013 г.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оценка загрязненности воды; классификация качества воды; трансграничный водный объект; химический индекс; химические параметры.

Yu. A. Fetisova, G. T. Frumin. CHANGES IN THE WATER QUALITY OF THE TRANSBOUNDARY LAKE PEIPUS

The aim of the study was to develop a technique for evaluation of transboundary water pollution. A method for evaluation of transboundary water quality was worked out. The method is based on calculation of the chemical index and classification of the water quality. It includes the measurement of several chemical parameters in water samples. The combination of the results is then represented as the chemical index CJ , which stands for the generalized water quality. A relative weight W is determined for each parameter. This weight can be considered as the priority level of each parameter. Then the value of the sub-index q is determined for each parameter with the help of digitized calibration graphs. The chemical index of water pollution CJ is the multiplicative function of sub-indices q in the degree equal to the relative weight of each parameter. Also, a classification system was produced for the pollution assessment of transboundary water bodies based on the 'broken stick' model. Water quantity was grouped into five classes. The suggested technique was applied to reveal changes in the water quality of the transboundary Lake Peipus from 2000 to 2015 year. The water in this period is generally classified as "low pol-

luted" (quality class 2). The chemical index *CJ* varied from the minimal 89.9 in 2003 to the maximal 96.8 in 2013.

К e y w o r d s: assessment of water pollution; classification of water quality; transboundary water body; chemical index; chemical parameters.

Введение

Двадцать европейских стран получают более 10 %, а пять – около 75 % водных ресурсов из соседних стран, расположенных выше по течению трансграничных водотоков [Конвенция..., 1992]. Необходимость совместного использования трансграничных вод практически всегда приводит к возникновению определенной напряженности в обществах, которые они объединяют. Это обусловлено разнообразными факторами, которые, помимо отношений между странами, включают вопросы национальной безопасности, развития экономического потенциала, открытости и экологической стабильности. Управление трансграничными водными ресурсами (ТВР) может стать как объединяющим моментом, так и причиной конфликта. В мире за последние полвека в отношении ТВР имели место более 500 международных конфликтов и около 40 взаимных претензий на грани конфликтов с применением насилия.

В 1992 г. Россия присоединилась к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, подписанной в том же году странами ЕС в Хельсинки. Международные конвенции и соглашения, регламентирующие взаимоотношения государств при совместном использовании водных объектов, охватывают широкий круг проблем, и одной из важнейших является проблема оценки качества водных ресурсов и степени их загрязненности [Рысбеков, 2009; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Фрумин, Тимофеева, 2014].

Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует политику охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами и их охране. Природоохранной целью РДВ является достижение «хорошего статуса» всех грунтовых и поверхностных вод. РДВ содержит ряд общих требований по экологической защите поверхностных вод («хороший экологический статус») и общие минимальные требования по химическим параметрам («хороший химический статус»). К примеру, в Эстонии используют

следующие показатели: биологические, физико-химические и гидроморфологические. Общая оценка состояния водного объекта дается на основании самого худшего показателя. В Российской Федерации с 2002 г. степень загрязненности вод оценивается гидрохимическими показателями с использованием «удельного комбинаторного индекса загрязненности воды» (УКИЗВ) (РД 52.24.643–2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»). Осложняет сотрудничество в сфере охраны трансграничных водных объектов отсутствие единых критериев оценки степени их загрязненности.

Чудское озеро (*Пейпси*; эст. *Peipsi*) – крупное пресноводное озеро, является северной составляющей Чудско-Псковского озера комплекса. Площадь зеркала озера составляет 2611 км² (73 % от озера комплекса), средняя глубина 8,3 м, наибольшая глубина 12,9 м, объем воды 21,79 км³. Соотношение эстонской и российской частей акватории 55/45 [Псковско-Чудское озеро..., 2012; Лесненко, 2012]. Северный и западный берега принадлежат Эстонской Республике, восточный – РФ. Посередине озера проходит граница России и Эстонии. Являясь одним из наиболее рыбопродуктивных озер Балтийского региона, Псковско-Чудское озеро играет существенную роль в экономике как Эстонии, так и северо-запада России, поэтому рациональное использование его биоресурсов и сохранение условий для их воспроизводства является приоритетной задачей обеих стран.

Цель проведенного исследования заключалась в разработке единой методики оценки загрязненности трансграничных вод сопредельных государств.

Материалы и методы

Попытка оценить качество воды на основе химических критериев была сделана в Баварской службе использования вод. Этот метод основан на исследованиях, проведенных ранее в США и Шотландии [Кимстач, 1993]. Метод включает измерение ряда химических параметров в пробах воды (табл. 1) с последующим представлением полученной комбинации

Таблица 1. Параметры, используемые для расчета химического индекса, и их относительный вес

Параметр	Вес, W	Параметр	Вес, W
Растворенный кислород, % насыщения	0,20	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,10
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	0,20	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,10
Температура воды, °С	0,08	pH	0,10
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,15	Электрическая проводимость, мкСм/см	0,07

Таблица 2. Аналитические зависимости между подындаксами и гидрохимическими показателями

Параметр	Интервал варьирования	Формула
% насыщения O ₂	72–100	q = 1,14 × [%O ₂] – 12,06
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	0,7–2,8	q = –8,61 × [БПК ₅] + 106,06
Температура воды, °С	15–28	q = 0,128t ³ – 8,456t ² + 173,4t – 1036 при t < 15 °С q = 100
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0–0,9	q = –62,41 × [NH ₄ ⁺] + 96,69
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0–32	q = –2,51 × [NO ₃ ⁻] + 94,37
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,6–2,4	q = –8,18 × [PO ₄ ³⁻] + 101,4
pH	6,1–8,2	q = –25,32 × (pH) ² + 365,5 × pH – 1219,6
Электрическая проводимость, l, мкСм/см	175–425	q = –0,1351 × l + 125,1

результатов в виде одного числа – химического индекса, который показывает обобщенное качество воды в данной пробе.

Химический индекс является мультипликативным и выражается в следующей форме:

$$CJ = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} = q_1^{w_1} \cdot q_2^{w_2} \dots q_n^{w_n}, \quad (1)$$

где *CJ* – химический индекс, безразмерная величина непрерывной шкалы от 0 до 100 (здесь 0 – худшее и 100 – лучшее качество воды); *n* – число параметров; *q_i* – подындекс для *i*-го параметра (безразмерная величина между 0 и 100, являющаяся функцией от *i*-го параметра); *W_i* – вес *i*-го параметра, число между 0 и 1, причем сумма весов равна 1, то есть

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (2)$$

Химический индекс вычисляется следующим образом.

1. Для каждого параметра определяется его относительный вес (*W*) (табл. 1). Он может рассматриваться как приоритетность (важность) каждого параметра.

2. Для каждого параметра находится значение подындакса *q*, получаемое по аналитически определенному параметру в данной пробе с помощью оцифрованных градуировочных графиков (исходные неоцифрованные графики приведены на рис. 1). С использованием оцифрованных градуировочных графиков выявлены аналитические зависимости между *q_i* и гидрохимическими показателями (табл. 2).

3. Рассчитываются значения *CJ* путем подстановки *W* и *q* в уравнение (1).

Исходные таблицы, по которым строились графики, в работе [Кимстач, 1993] отсутствуют. Поэтому была проведена их оцифровка.

В литературных источниках можно найти обширный материал о разработанных системах классификации пресноводных водоемов, имеющих разную степень «законодательной силы» и использующих различные комплексы гидрохимических и гидробиологических показателей. Существующий подход к квантованию и выделению граничных значений числовых признаков, используемых для группировки водных объектов по классам качества, чаще всего достаточно произволен и основывается на опыте исследователя. Традиционно выбирается некоторая шкала с числом градаций в пределах «магических» чисел от 3 до 7, например: «Очень чисто» – «Чисто» – «Не очень чисто» – «Не очень грязно» – «Грязно» – «Ну очень грязно» – «Катастрофически грязно». В дальнейшем, с использованием интуиции и квалификации разработчика, литературных данных, полученных «в начале прошлого века на одной английской реке», или общих соображений здравого смысла, каждой градации назначается конкретный диапазон значений из некоторого списка потенциально пригодных для этого показателей [Шитиков и др., 2003].

В дополнение к изложенному была разработана классификационная система оценки загрязненности трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня» [Мостеллер, 1971]. При этом было принято во внимание, что величина *CJ* варьирует от 0 до 100 (0 ≤ *CJ* ≤ 100). Количество классов качества вод было принято равным пяти (*n* = 5) (табл. 3).

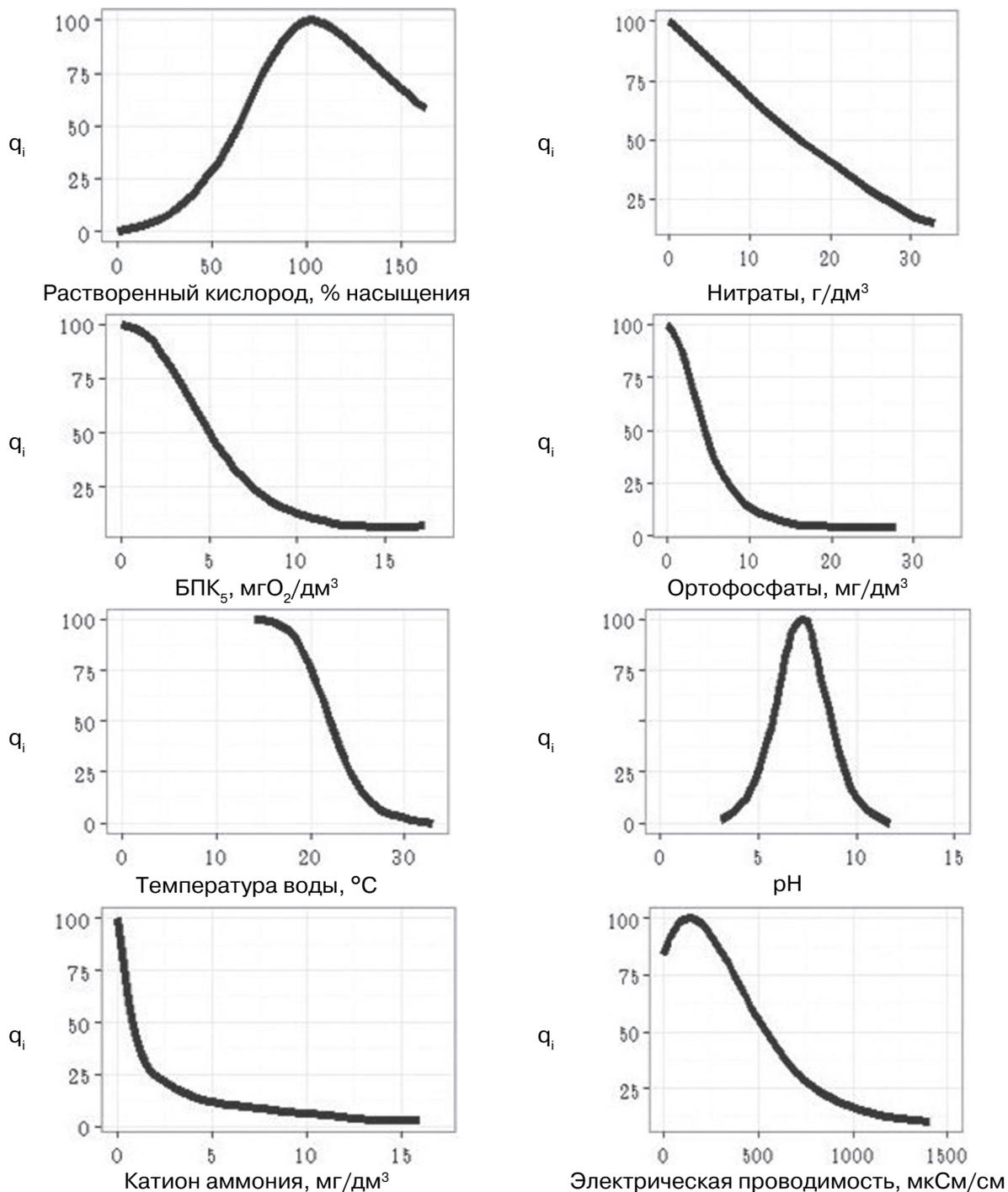


Рис. 1. Градуировочные кривые для определения химического индекса

Результаты и обсуждение

Для оценки динамики качества воды трансграничного Чудского озера были использованы первичные данные гидрохимического мониторинга, проведенного Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ в период с 2000 по 2015 г. (табл. 4 и 5; рис. 2). При расчетах

использованы среднегодовые значения параметров (в целом по озеру).

На приведенном рисунке прямая линия – линия тренда. Коэффициент детерминации равен 0,15, что свидетельствует о практическом отсутствии тренда величин химического индекса (CJ) за рассматриваемый период.

Математико-статистический анализ позволил выявить заметную тесноту связи между

Таблица 3. Классификация качества поверхностных вод

Характеристика состояния загрязненности воды	Значение <i>СJ</i>	Класс качества вод
Условно чистая	98–100	1
Слабозагрязненная	88–97	2
Загрязненная	73–87	3
Грязная	46–72	4
Экстремально грязная	0–45	5

Таблица 4. Среднегодовые значения химических показателей Чудского озера

Год	% насыщения O ₂	БПК ₅ , мгO ₂ /дм ³	t, °C	NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	pH	Электрическая проводимость, мкСм/см
2000	96	2,0	15,3	0,08	0,1	0,02	8,2	261,0
2001	91	2,1	15,2	0,12	0,1	0,02	7,9	224,8
2002	95	1,8	14,6	0,04	0,1	0,02	8,4	234,3
2003	86	2,2	12,8	0,08	0,2	0,02	8,2	208,5
2004	91	1,6	12,9	0,06	0,6	0,01	8,3	239,3
2005	96	1,6	15,2	0,10	0,3	0,03	8,2	267,7
2006	98	1,4	13,3	0,05	0,2	0,02	8,6	265,2
2007	103	1,7	13,2	0,04	0,5	0,01	8,5	262,5
2008	103	1,4	11,0	0,07	0,5	0,01	8,4	267,3
2009	99	1,1	11,6	0,02	0,5	0,03	8,3	271,3
2010	96	2,4	14,5	0,02	0,7	0,03	8,1	259,6
2011	100	1,4	14,8	0,02	0,7	0,02	8,2	265,8
2012	101	1,5	11,9	0,08	0,6	0,02	7,9	254,0
2013	111	2,1	12,2	0,06	0,9	0,02	6,8	287,2
2014	92	1,8	13,7	0,22	0,3	0,02	8,0	286,9
2015	100	2,1	13,5	0,09	0,2	0,02	8,4	306,3

Таблица 5. Динамика качества воды Чудского озера

Год	<i>СJ</i>	Качество воды	Класс качества	УКИЗВ	Качество воды
2000	92,3	Слабозагрязненная	2	-	-
2001	91,9	Слабозагрязненная	2	-	-
2002	91,0	Слабозагрязненная	2	-	-
2003	89,9	Слабозагрязненная	2	-	-
2004	91,5	Слабозагрязненная	2	-	-
2005	92,5	Слабозагрязненная	2	2,58	Загрязненная
2006	90,3	Слабозагрязненная	2	3,00	Загрязненная
2007	92,1	Слабозагрязненная	2	2,57	Загрязненная
2008	93,3	Слабозагрязненная	2	2,25	Загрязненная
2009	94,0	Слабозагрязненная	2	2,44	Загрязненная
2010	92,1	Слабозагрязненная	2	3,03	Очень загрязненная
2011	94,2	Слабозагрязненная	2	1,86	Слабозагрязненная
2012	95,3	Слабозагрязненная	2	2,00	Загрязненная
2013	96,8	Слабозагрязненная	2	2,15	Загрязненная
2014	90,9	Слабозагрязненная	2	2,72	Очень загрязненная
2015	90,6	Слабозагрязненная	2	2,14	Загрязненная

СJ и УКИЗВ по шкале Чеддока (коэффициент корреляции $r = 0,6$) [Макарова, Трофимец, 2002]. После отбраковки «выскакивающих значений» ($СJ = 90$; УКИЗВ = 2,14 в 2015 г.) были выполнены условия, предъявляемые к уравнению линейной регрессии [Дружинин,

Сикан, 2001]. В результате выявлена статистически значимая зависимость между *СJ* и УКИЗВ с высокой теснотой связи ($r = 0,8$) (рис. 3).

$$СJ = 103 - 4,02 * УКИЗВ. \quad (3)$$

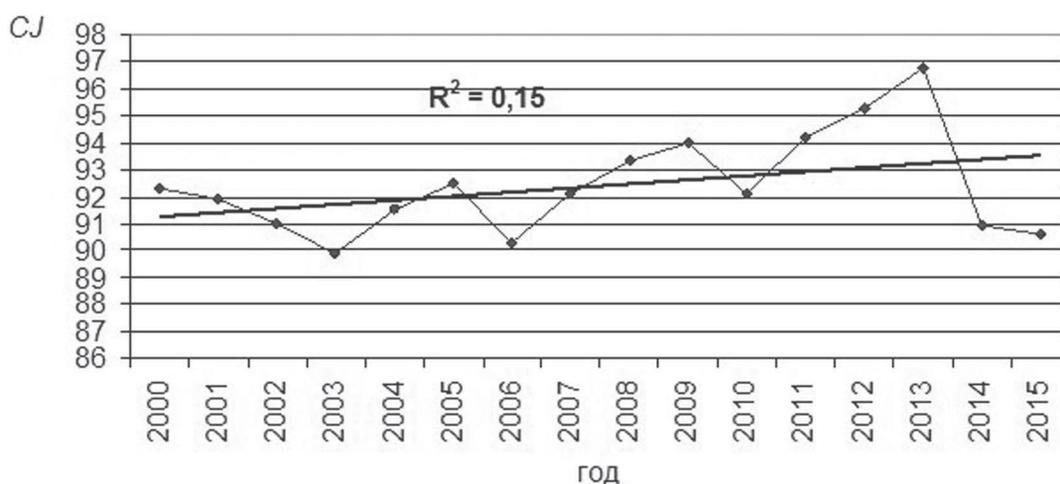


Рис. 2. Динамика качества воды трансграничного Чудского озера

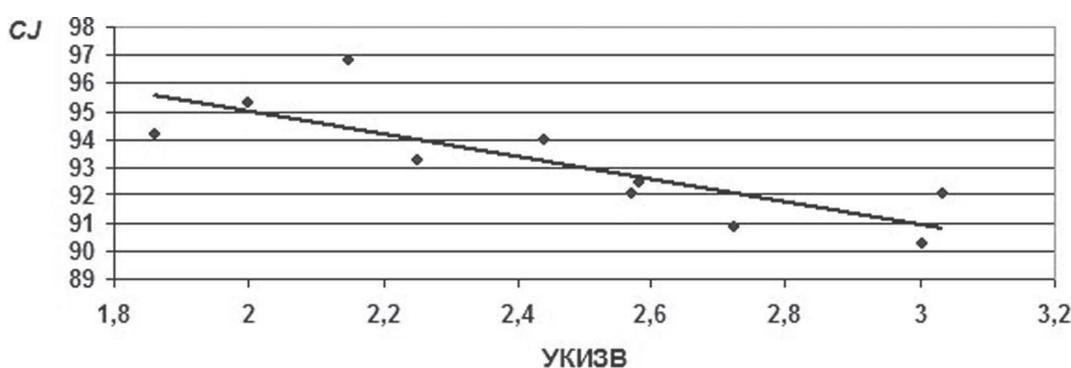


Рис. 3. Соотношение между химическими индексами (CJ) и удельными комбинаторными индексами загрязненности воды (УКИЗВ) в Чудском озере

Выводы

1. За период с 2000 по 2015 г. вода Чудского озера характеризуется как «слабозагрязненная» (второй класс качества). За рассмотренный период химический индекс (CJ) варьировал от минимального значения в 2003 г. (89,9) до максимального в 2013 г. (96,8). Среднее значение CJ за весь рассматриваемый период – 92,4.

2. Выявлена статистически значимая зависимость между химическими индексами (CJ) и удельными комбинаторными индексами загрязненности воды (УКИЗВ) с высокой тесной связью (коэффициент корреляции $r = 0,8$).

Литература

Дружинин В. С., Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2001. 169 с.

Кимстач В. А. Классификация качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сообщества. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 48 с.

Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер. Хельсинки. 17 марта 1992 г. ООН. 23 с.

Лесненко В. К. Природные ресурсы Псковской области, их рациональное использование. Псков: ПГПИ, 2012. 136 с.

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

Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1971. 104 с.

Псковско-Чудское озеро / Науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 с.

Рысбеков Ю. Х. Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / Под ред. В. А. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК, 2009. 204 с.

Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорусская наука, 2011. 329 с.

Фруммин Г. Т., Тимофеева Л. А. Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. 2014. Т. 6, № 1. С. 174–189.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Поступила в редакцию 11.01.2017

References

Druzhinin V. S., Sikan A. V. Metody statisticheskoi obrabotki gidrometeorologicheskoi informatsii. Uchebnoe posobie [Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Tutorial]. St. Petersburg: RGGMU, 2001. 169 p.

Kimstach V. A. Klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod v stranakh Evropeiskogo ekonomicheskogo soobshchestva [Classification of surface water quality in the countries of the European Economic Community]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. 48 p.

Konventsia po okhrane i ispol'zovaniyu transgranichnykh vodotokov i mezhdunarodnykh ozer [The convention on the protection and use of transboundary water currents and international lakes]. Helsinki. March 17, 1992. OON. 23 p.

Lesnenko V. K. Prirodnye resursy Pskovskoi oblasti, ikh ratsional'noe ispol'zovanie [Natural resources of Pskov Oblast, their rational use]. Pskov: PGPI, 2012. 136 p.

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

Mosteller F. Pyat'desyat zanimatel'nykh veroyatnostnykh zadach s resheniyami [Fifty entertaining

probabilistic tasks with decisions]. Moscow: Nauka, 1971. 104 p.

Pskovsko-Chudskoe ozero [Lake Peipsi]. Scient. eds Tarmo Timm, Anto Raukas, Yuta Khaberman, Ago Yaani. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 p.

Rysbekov Yu. Kh. Transgranichnoe sotrudnichestvo na mezhdunarodnykh rekakh: problemy, opyt, uroki, prognozy ekspertov [Transboundary cooperation on the international rivers: problems, experience, cases, forecasts of experts]. Ed. V. A. Dukhovnyi. Tashkent: NITS MKVK, 2009. 204 p.

Semenchenko V. P., Razlutskiy V. I. Ekologicheskoe kachestvo poverkhnostnykh vod [Ecological quality of surface waters]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. 329 p.

Frumin G. T., Timofeeva L. A. Transgranichnye vodnye ob'ekty i vodosbory Rossii: problemy i puti resheniya [Transboundary water objects and catchments of Russia: problems and approaches to their solution]. *Biosfera* [Biosphere]. 2014. Vol. 6, no. 1. P. 174–189.

Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tolyatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.

Received January 11, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фетисова Юлия Александровна

аспирант кафедры экологии и биоресурсов
Российский государственный гидрометеорологический университет
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, Россия, 195196
эл. почта: julika92@mail.ru
тел.: +79111444723

Фрумин Григорий Тевелевич

профессор кафедры экологии и биоресурсов, д. х. н.
Российский государственный гидрометеорологический университет
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, Россия, 195196
эл. почта: gfrumin@mail.ru
тел.: +79111274098

CONTRIBUTORS:

Fetisova, Yulia

Russian State Hydrometeorological University
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia
e-mail: julika92@mail.ru
tel.: +79111444723

Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru
tel.: +79111274098

УДК 551.3.051:550.46:502.51:504.5 (407.22)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПРОЦЕССА СОВРЕМЕННОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ОЗ. ЛАМБА, ПЕТРОЗАВОДСК, КАРЕЛИЯ)

**З. И. Слуковский¹, Н. В. Ильмаст², И. В. Суховская²,
Е. В. Борвинская², М. А. Гоголев¹**

¹Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

²Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Представлены данные по химическому составу донных отложений малого городского озера Ламба, расположенного в черте г. Петрозаводска (Республика Карелия). В работе использованы современные прецизионные методы исследования вещества. Химический анализ донных отложений оз. Ламба проводился с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что изученные озерные отложения относятся к железистым (лимонитовым) сапропелям с повышенным содержанием органики. Показано, что распределение тяжелых металлов и сопутствующих им микроэлементов в изученных озерных осадках отражает влияние на экосистему водоема промышленных предприятий города, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также процессы техногенного загрязнения в результате трансграничного переноса некоторых металлов. Распределение в толще изученной колонки донных отложений V, Cr, Ni указывает на значительное влияние Петрозаводской теплоцентрали (ТЭЦ). Аномально высокие концентрации Pb в слоях осадков связаны с повсеместным загрязнением окружающей среды этим тяжелым металлом вследствие его поступления от выбросов автомобильного транспорта, а также в результате переноса на значительные расстояния ряда поллютантов через атмосферу планеты. Распределение концентраций Co, Cu, Zn, Mo, W отражает воздействие на экосистему озера Ламба выбросов промышленных предприятий машиностроительного комплекса г. Петрозаводска.

Ключевые слова: донные отложения; Республика Карелия; Петрозаводск; озеро Ламба; седиментогенез; тяжелые металлы; антропогенное влияние.

**Z. I. Slukovskii, N. V. Ilmast, I. V. Sukhovskaya, E. V. Borvinskaya,
M. A. Gogolev. THE GEOCHEMICAL SPECIFICS OF MODERN
SEDIMENTATION PROCESSES ON THE BOTTOM OF A SMALL LAKE
LAMBA UNDER TECHNOGENIC IMPACT**

The data on the chemical composition of bottom sediments of the small urban Lake Lamba located in the city of Petrozavodsk (Republic of Karelia) are presented. In this investigation we used modern precision methods for studying matter. Chemical analysis of bottom sediments of Lake Lamba was conducted using X-ray fluorescence spectrometer ARL ADVANT'X and mass spectrometer XSeries-2 ICP-MS. It was established that sediments in the lake are ferruginous (limonite) sapropels with a high content of organic matter. It

is shown that the distribution of heavy metals and their accompanying microelements in the studied freshwater sediments reflects the industrial history of the city of Petrozavodsk and the general man-generated pollution in anthropogenically disturbed territories of the world. The distribution of V, Cr, Ni concentrations in the bottom sediments indicates a significant influence of the Petrozavodsk heating plant. The abnormally high Pb concentrations in the sediment layers are associated with global pollution of the environment by this heavy metal due to its input from traffic emissions. The distribution of Co, Cu, Zn, Mo, W concentrations reflects the impact of industrial enterprises in Petrozavodsk on the ecosystem of Lake Lamba.

Key words: bottom sediments; Republic of Karelia; Petrozavodsk; Lake Lamba; sedimentogenesis; heavy metals; human impact.

Введение

Осадконакопление, или седиментация, – это сложный процесс взаимодействия живого вещества и абиотических компонентов, происходящий на границе лито-, гидро- и биосферы. На техногенно нарушенных территориях этот процесс может приобретать крайне специфический характер, учитывая ту роль, которую играет человечество последние несколько столетий в видоизменении окружающей среды. Известно, что донные отложения (ДО) малых озер, расположенных в пределах антропогенно нарушенной среды, являются хорошими аккумуляторами различных загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты с водосборного бассейна [Даувальтер, 2012]. Кроме того, на формирование химического состава современных осадков может оказывать влияние фактор трансграничного переноса некоторых загрязнителей на огромные расстояния (в том числе Pb), происходящего через атмосферу [Norton et al., 1990; Keinonen, 1992; Даувальтер, 2006]. Таким образом, даже в ДО озер условно-фоновых районов, удаленных от прямого техногенного влияния, могут быть установлены повышенные концентрации таких элементов, как Pb, Cd, Tl, которые, как отмечается в [McConnell, Edwards, 2008], являются продуктами сжигания угля на крупных заводах, начавших свою деятельность еще в середине-конце XIX в. Экосистемы водных объектов промышленных районов и урбанизированной среды подвержены загрязнению значительно большим спектром загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов (ТМ), включающих в свой состав, кроме уже указанных элементов, Hg, As, Zn, V, Ni, Cu, Co, Cr, Mo, W, Mn, что обуславливает образование техногенных илов как особого типа ДО антропогенно нарушенной среды [Саэт и др., 1990; Янин, 2013]. Учитывая интенсивный рост городов и их числа по всему миру в течение XX и начала XXI веков, проблема загрязнения окружающей среды ТМ стала поистине

глобальной проблемой современности, актуальность которой не меняется до сих пор. При этом основу загрязнения по-прежнему составляют выбросы промышленных предприятий, от специфики которых напрямую зависит специфика набора тех или иных ТМ, накапливающихся в геологической и биологической среде. В малых бессточных озерах, расположенных на городских территориях и в промышленно развитых районах, химический состав ДО служит своеобразной летописью техногенных событий прошлого и настоящего, с которыми тесно связаны экологические изменения, то есть изменения на уровне живых организмов, в отдельно взятые периоды времени.

На территории Республики Карелия насчитывается около 61 тыс. озер. Преимущественно это малые озера площадью до 1 км². Устойчивое развитие территории указанного региона РФ напрямую зависит от состояния его водных объектов, в том числе озер, имеющих важное хозяйственное и/или рекреационное значение. Как уже отмечалось выше, водоемы, расположенные вблизи населенных пунктов, в том числе городов, априори подвержены изменениям на уровне биотических и абиотических компонентов экосистем. Однако о степени и глубине этих изменений можно судить только по результатам детального научного исследования, задачей которого может быть выявление определенных маркеров (геохимических, химических, биологических) техногенного присутствия в среде водной экосистемы. Таким образом, целью данной работы является оценка геохимической специфики современных осадочных образований на дне малого озера Ламба, расположенного на территории города Петрозаводска, с учетом как природных, так и техногенных факторов урбанизированной среды.

Материалы и методы

Озеро Ламба (61°48.428' с. ш. 34°14.967' в. д.) – это небольшой по площади

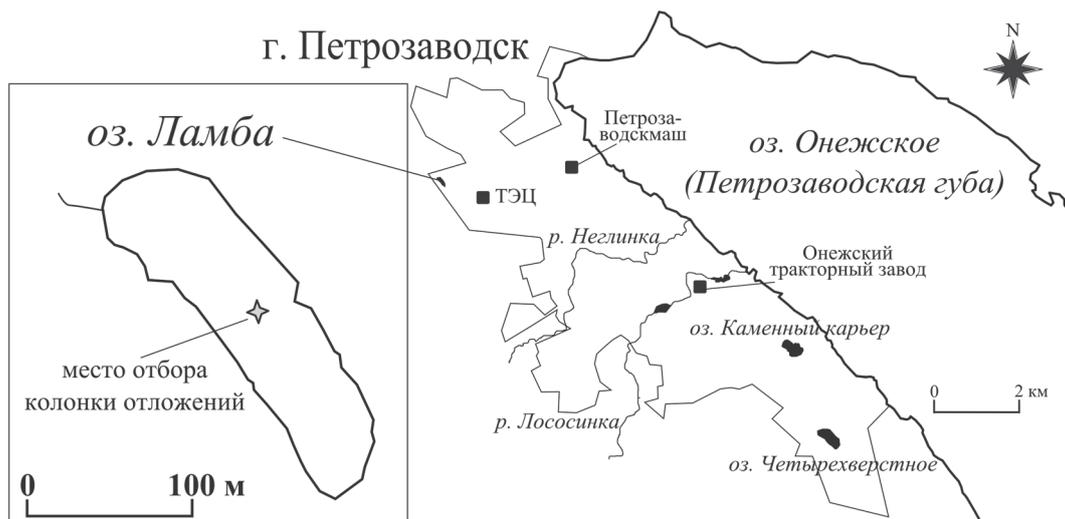


Рис. 1. Карта-схема расположения района исследования

водоем (0,014 км²), расположенный в северо-западной части города Петрозаводска, в микрорайоне Сулажгора (рис. 1). Берега водоема низкие, заболоченные. Из северной части озера Ламба вытекает ручей Студенец, впадающий в реку Томицу. Длина береговой линии составляет 0,58 км [Водные..., 2013]. Средняя глубина водоема равна 3,4 м, максимальная – 5,2 м [Потахин, 2011]. Для воды озера Ламба характерна высокая цветность и низкая прозрачность. Следствием данного факта является бедный видовой состав и низкая плотность фитоперифитона. В фитоперифитоне озера Ламба на немногочисленных макрофитах встречено 29 видов синезеленых, зеленых и диатомовых водорослей [Комулайнен, 2014].

В августе 2015 года с помощью пробоотборника Limnos (Финляндия) была отобрана колонка осадков высотой 55 см в самой глубокой части озера (около 5 м), где происходит максимальное накопление ДО [Потахин, 2011]. Отобранная колонка в полевых условиях разбиралась по пакетам на образцы с интервалом 5 см. Кроме того, в настоящих исследованиях были использованы три пробы ДО, отобранные также из центральной части изучаемого водного объекта в июне 2013 года с помощью дночерпателя Экмана – Берджа и представляющие собой нестратифицированные осадки до глубины 20 см [Слуковский, Медведев, 2015].

Просушивание образцов проб ДО до воздушно-сухого состояния проводилось в лабораторных условиях. Лабораторные исследования выполнялись на базе Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск. Содержание микроэлементов (Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, V, W, Li, Rb, Cs, Sr, Ba)

в пробах ДО определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific).

Разложение образцов ДО для ICP-MS-анализа проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовали аналитические навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1 – ГСО 7126–94). Подробная методика подготовки проб ДО описана в [Слуковский, 2015].

Содержание главных элементов (оксидов Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) было определено с помощью рентген-флуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT’X (Thermo Fisher Scientific). Подготовка пробы к анализу включала в себя плавление образца и флюса в золото-платиновых тиглях в электроплавильной печи для приготовления образцов Katanax K1 (SPEX SamplePrep), остывание стекловатого расплава и изготовление из него стекляннного диска для измерений. Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 1100 °С. При исследовании ДО водных объектов данный показатель может служить хорошей количественной характеристикой содержания органики в водных осадках [Даувальтер, 2012]. Концентрации микроэлементов представлены в мг/кг (миллиграммы на килограмм) и в вес. % (весовые проценты).

Для получения микроскопических изображений минералов вивианита и лимонита из изученных донных отложений озера Ламба, а также анализа их химического состава был

Таблица 1. Содержание микроэлементов в различных природных объектах Республики Карелия, мг/кг

	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	W	Pb
1	13,1	49,5	32,0	6,3	20,5	15	49	н/д	128	1,3	н/д	181	н/д	10,4
2	н/д	62,6	30,4	7,1	19,4	32	82	н/д	н/д	0,9	1,4	н/д	0,8	20,6
3	15,1	120,7	53,9	16,1	27,9	57	134	52,5	319	0,9	4,6	615	2,3	25,8
4	39,6	137	141	20,5	60,5	111	241	70,8	83	2,3	2,7	373	1,6	47,6

Примечание. 1 – ДО Карелии [Геохимическое..., 2004], 2 – почвы г. Петрозаводска [Рыбаков и др., 2013], 3 – речные отложения г. Петрозаводска [Слуковский, Светов, 2016], 4 – ДО оз. Четырехверстное (г. Петрозаводск) [Слуковский, Медведев, 2015], н/д – нет данных.

Таблица 2. Содержание различных веществ и химических элементов в ДО озера Ламба

Вещества и элементы	Образцы проб ДО 2015 года, послойный отбор (глубина в см)											Пробы дночерпателя 2013 года		
	0–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	31–35	36–40	41–45	46–50	51–55	01 (б/с)	02 (б/с)	03 (б/с)
SiO ₂	32,0	19,6	27,0	19,9	21,1	20,7	21,0	16,2	14,3	19,8	18,5	24,4	23,9	31,3
Al ₂ O ₃	7,0	6,2	4,2	3,5	3,0	2,6	2,8	3,1	2,1	1,7	1,3	5,7	5,1	8,4
Σ(FeO+Fe ₂ O ₃)	20,1	10,2	13,1	9,2	9,1	9,5	10,9	11,9	19,3	19,9	23,8	15,1	13,7	10,5
Na ₂ O	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	н/о	н/о	н/о	0,2	0,3	0,8
CaO	1,6	0,7	2,3	2,0	2,2	2,2	3,6	4,3	3,6	2,3	1,6	1,1	1,2	1,6
K ₂ O	1,1	1,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,8	0,7	1,4
MgO	1,0	1,1	0,6	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	н/о	0,7	0,7	1,4
MnO	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2
TiO ₂	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	н/о	0,3	0,2	0,4
P ₂ O ₅	4,0	0,9	1,5	1,7	1,9	2,4	3,6	4,2	6,0	5,7	3,4	2,6	2,5	1,2
ППП	31,0	58,7	49,4	62,2	61,5	61,3	56,4	58,4	53,1	49,4	50,7	48,3	50,9	42,0
Li	12,1	27,2	7,8	6,1	2,5	1,9	2,0	2,5	1,6	1,0	0,2	15,3	12,4	19,1
V	994	3190	517	117	43	32	26	25	21	16	12	1850	1510	854
Cr	51,5	139,7	34,8	29,1	28,0	29,2	23,6	19,0	15,2	11,6	8,7	90,6	73,1	73,7
Co	17,5	23,6	16,3	14,0	17,2	16,9	17,9	17,0	15,1	12,2	10,3	20,1	18,8	18,1
Ni	176	558	109	36	26	20	19	18	16	13	10	331	225	209
Cu	726	468	111	56	58	56	76	80	61	39	14	383	263	499
Zn	629	475	313	299	377	363	622	868	610	390	88	530	427	452
Rb	28,0	62,2	15,5	11,2	6,5	5,4	6,4	8,2	5,3	2,8	0,3	39,7	31,9	53,3
Sr	59,9	79,6	51,1	55,1	62,8	64,5	115	163,2	107,4	60,0	21,7	68,4	65,3	114
Mo	6,3	6,0	3,8	2,6	3,3	3,2	3,6	3,9	3,4	3,1	1,8	5,9	5,0	2,4
Cd	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,4	0,2	0,9	0,8	0,6
Ba	571	606	372	667	872	796	989	1190	1520	806	513	526	428	523
W	2,3	1,2	1,9	1,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	н/о	н/о	1,9	1,8	1,3
Pb	39	31	50	68	113	124	130	61	29	12	3	52	57	28

Примечание. Содержание главных элементов от SiO₂ до P₂O₅ и ППП указаны в вес. %, концентрации микроэлементов – в мг/кг; б/с – без стратификации; н/о – ниже предела обнаружения прибора.

использован электронный микроскоп (СЭМ) VEGA II LSH с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350. Важным методическим моментом при изучении образцов проб стало увеличение времени набора спектра в точках анализа до 600 секунд.

Статистическая обработка выполнена с помощью программы Microsoft Excel 2007. При анализе полученных данных рассчитаны следующие коэффициенты, модули и другие математические параметры:

- коэффициент вариации, который рассчитывается как отношение величины стандартного отклонения выборки к среднеарифметическому (невзвешенному) значению, умноженному на 100 и представленному в процентах;
- коэффициент корреляции, рассчитанный по формуле Пирсона (при этом все значения в выборке по каждому химическому элементу или веществу были предварительно нормированы по значению максимума соответствующей выборки);

- алюмокремниевый модуль, который рассчитан по формуле Al_2O_3/SiO_2 [Интерпретация..., 2001];
- модуль степени дифференциации осадочного материала, рассчитываемый по формуле SiO_2/Na_2O+K_2O [Ефремова, Стафеев, 1985].

Треугольная диаграмма соотношения K-Al-(Na+Ca) построена на основе содержания окислов указанных элементов, при этом значения величины каждого из компонентов представлены на графике в процентах от суммы всех главных элементов, используемых для построения данной диаграммы.

Для графической иллюстрации результатов использованы программы EasyCapture 1.2.0, Inkscape 0.48.4 и TriQuick 1.0.0.

Сравнительный анализ содержания различных химических элементов в ДО озера Ламба проводился с использованием опубликованных в печати и фондовых научных источников, данные из которых для удобства дальнейшего описания результатов сведены в единую таблицу 1.

Результаты исследований

Органическое вещество и главные элементы

Изученные ДО озера Ламба представляют собой сапропелевый ил черного цвета. Содержание органики колеблется от 31 до 62 вес. %, максимальное значение отмечено для глубины

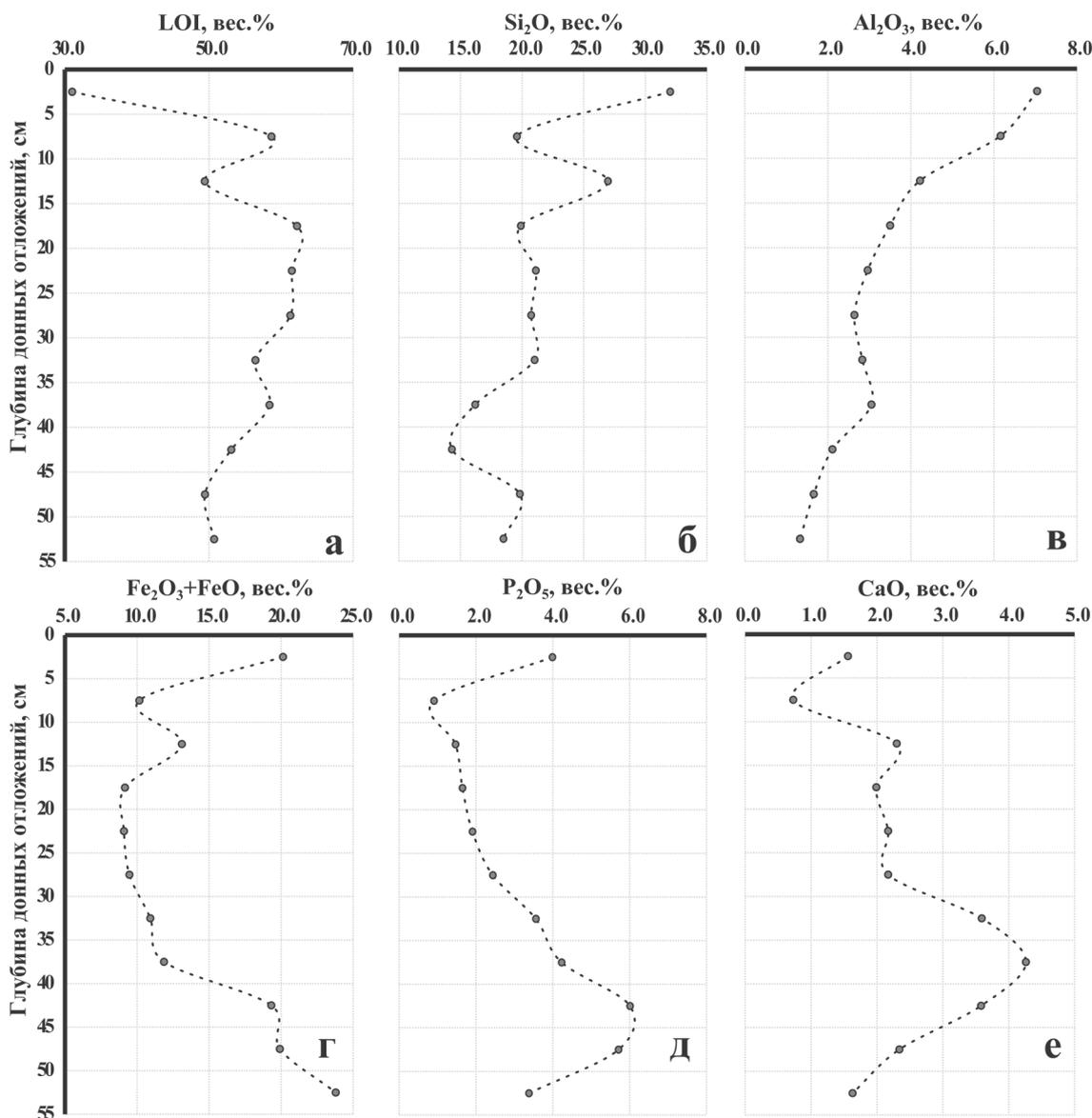


Рис. 2. Вертикальное распределение органического вещества, кремнезема и оксида Al, суммарного Fe, оксидов P и Ca в колонке ДО озера Ламба

Таблица 3. Корреляционная матрица главных элементов и органического вещества ДО озера Ламба

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Σ (FeO+Fe ₂ O ₃)	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
Al ₂ O ₃	0,79	1,00								
Σ (FeO+Fe ₂ O ₃)	-0,05	-0,25	1,00							
Na ₂ O	0,76	0,95	-0,26	1,00						
CaO	-0,50	-0,55	-0,03	-0,49	1,00					
K ₂ O	0,74	0,99	-0,17	0,96	-0,55	1,00				
MgO	0,68	0,97	-0,27	0,94	-0,41	0,98	1,00			
MnO	-0,41	-0,53	0,63	-0,47	0,68	-0,46	-0,42	1,00		
TiO ₂	0,78	0,99	-0,15	0,95	-0,59	1,00	0,96	-0,48	1,00	
P ₂ O ₅	-0,42	-0,53	0,67	-0,52	0,58	-0,46	-0,44	0,95	-0,48	1,00
ППП	-0,74	-0,56	-0,57	-0,54	0,29	-0,59	-0,52	-0,18	-0,61	-0,19

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции >0,7 (R_{кр.} = 0,66 для p < 0,01, R_{кр.} = 0,53 для p < 0,05).

ДО 16–20 см, минимальное – в самом верхнем слое озерных осадков (табл. 2). Следует отметить, что содержание органического вещества имеет довольно низкий коэффициент вариации по всему разрезу осадков – 17 %, что позволяет говорить о среднем значении 53,8 вес. %. Максимальное содержание SiO₂, напротив, отмечается на глубине ДО 0–5 см (32,0 вес. %), минимальное – 14,3 вес. % – в слое 41–45 см (рис. 2, б). Таким образом, общий разброс значений концентраций кремнезема также небольшой – 23,2 %.

Самый большой коэффициент вариации рассчитан для оксида Na – 109 %, это связано с тем, что в нижних слоях толщи изученных отложений Na₂O не обнаружен. Максимальное накопление этого элемента отмечено для глубины ДО 0–5 см (табл. 2). Аналогичным распределением характеризуются также Al₂O₃ (вариация 52,3 %), K₂O (87,5 %), MgO (68,8 %) и TiO₂ (89,7 %), то есть по всему изученному разрезу сверху вниз концентрации этих веществ постепенно снижаются. Уровень корреляционной связи между всеми обозначенными оксидами колеблется от 0,94 до 1,00 (при p < 0,01) (табл. 3). При этом теснота связи концентраций Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O и TiO₂ с кремнеземом несколько ниже указанных цифр.

Отдельно следует рассматривать распределение в изученных ДО озера Ламба Fe, Mn, P и Ca (рис. 2, г–е). Максимальное содержание этих главных элементов в озерных осадках приходится на нижние слои толщи – глубины от 36 до 55 см. Кроме того, в вертикальном распределении оксидов Fe, Mn, P и Ca имеются одинаковые пики концентраций на глубине 0–5 см. Наибольший уровень вариации значений содержания отмечен для P₂O₅ – 53,1 %, остальные вещества по убыванию коэффициентов вариации выстраиваются в следующем порядке: MnO (47,5) > CaO (43,1) > Fe₂O₃ + FeO

(38,0). Из таблицы 3 видно, что указанные элементы тесно коррелируют между собой, за исключением пары Fe-Ca (R = -0,03 при p > 0,05). Наибольший коэффициент корреляции среди компонентов этой ассоциации, R = 0,95 (при p < 0,01), отмечен для взаимоотношения MnO и P₂O₅. Кроме того, отмечается явный антагонизм P и Al в изученных ДО петрозаводского озера, коэффициент корреляции R = -0,53 (при p < 0,01). Значимая корреляционная связь со знаком минус установлена также для пар Fe-ППП (R = -0,57) и Si-ППП (R = -0,74) при p < 0,01.

Тяжелые металлы и другие микроэлементы

Из элементов **первого и второго класса опасности** (Pb, Cd, Zn, Cr, Co, Ni, Cu, Mo) наибольший уровень накопления в изученной колонке ДО озера Ламба отмечен для Zn, концентрации которого в осадках варьируют от 88 до 868 мг/кг (табл. 2). Максимальное содержание этого тяжелого металла установлено на глубине ДО 36–40 см, что в 1,4–2,9 раза выше, чем в верхних слоях изученной толщи, от 0 до 20 см. Содержание Zn в отложениях озера в 6–13 раз превышает фоновый уровень накопления этого элемента в озерных и речных осадках Карелии и в 4–11 раз – среднее содержание в почвах Петрозаводска. Исключением являются осадки на глубине 51–55 см, где концентрация этого элемента находится на уровне фона (табл. 1 и 2). Свинец также неравномерно распределен по изученному разрезу ДО. На глубинах 46–55 см отмечаются фоновые и ниже фоновых концентрации этого тяжелого металла, максимальные значения (113–130 мг/кг) установлены в слоях 21–35 см, что в 11–12 раз выше фона. В слоях 0–20 см установлены концентрации Pb, превышающие фоновые значения региона в 3–7 раз, а геохимический фон

города – в 2–3 раза (табл. 1). Содержание Cd в ДО озера Ламба оказалось ниже общегородского уровня этого элемента во всех изученных образцах проб. Максимальная концентрация указанного тяжелого металла установлена на глубине 16–20 см отобранных осадков – 0,97 мг/кг (табл. 2). При этом общий разброс значений (коэффициент вариации) по Cd – наименьший из всех трех элементов первого класса опасности – составляет 31,2%. Аномально высоких пиков концентраций этого металла в отличие от Zn и Pb по всему разрезу не выявлено.

Минимальные концентрации Cr, Co, Ni, Cu, Mo установлены в самом глубоком слое изученной толщи озерных осадков – 51–55 см, здесь уровень содержания этих элементов близок к фоновому для территории Карельского региона (табл. 1 и 2). Для Cr этот уровень поддерживается до слоя отложений от 6 до 10 см, где происходит увеличение содержания этого металла с 34,8 до 140 мг/кг, что в 4,4 раза выше фонового уровня. Максимальные содержания Co (23,6 мг/кг) и Ni (558) также приурочены к слою 6–10 см, для Ni это 27-кратное увеличение фона республики и 28-кратное – фона территории города (табл. 1 и 2). Данный экстремум способствует установлению коэффициента вариации содержания Ni в ДО Ламба, равного 179%. Остальные элементы второго класса опасности выстраиваются в следующий ряд по убыванию величины разброса значений их концентрации в исследованных озерных осадках: Cu (142) > Cr (103) > Mo (36) > Co (21). Наибольшие концентрации Cu (726 мг/кг) и Mo (6,3) установлены на глубине 0–5 см ДО изученного водоема, что составляет 49- и 5-кратное превышение фонового уровня ДО Карелии соответственно (табл. 1 и 2). По Cu также отмечен самый высокий уровень превышения геохимического фона почв города среди элементов второго класса опасности – от 4 до 23 раз в слоях осадков от 0 до 15 см.

Наибольшие концентрации элементов **третьего класса опасности V** (до 3190 мг/кг) и **W** (до 2,31) приурочены к глубине ДО озера Ламба от 0 до 20 см (табл. 2). Экстремум V в слое отложений 6–10 см по отношению к фоновому уровню – самый большой среди всех исследованных тяжелых металлов, отмечается 64-кратное превышение фона Карелии и 51-кратное – фона Петрозаводска (табл. 2). В смежных слоях изученных осадков этот уровень значительно ниже – 16–20-кратное увеличение природного уровня по региону. На глубине ДО оз. Ламба ниже 21 см указанный тяжелый металл накапливается в незначительных

количествах (от 12 до 43 мг/кг). Поэтому показатель общего разброса значений концентраций V (коэффициент вариации) по изученному разрезу составляет 211%. Для W данный показатель почти в два раза ниже – 98%. Превышение фонового уровня городских почв по этому микроэлементу достигает 3-кратного значения. В слоях 46–55 см ДО городского озера накопления W не установлено (табл. 2).

Щелочные металлы Li и Rb имеют максимумы концентраций на глубине ДО 6–10 см: 27 и 62 мг/кг соответственно (табл. 2). Содержание этих элементов в слоях осадков с 21 до 55 см близко к фоновому уровню для территории Карелии и даже ниже его (табл. 2). На глубине озерных отложений 51–55 см концентрации Li (0,2 мг/кг) и Rb (0,3 мг/кг) имеют почти нулевые значения, поэтому коэффициенты вариации для обоих элементов составляют 134 и 128% соответственно. Наибольшее накопление в отложениях озера Ламба **щелочноземельных металлов Ba и Sr** приходится на среднюю часть изученного разреза ДО, глубину от 31 до 45 см (табл. 2). Аномально высокие концентрации Ba (989–1520 мг/кг) в этих слоях в 6–8 раз превышают содержание указанного металла в фоновых районах Карелии. В остальных изученных пробах ДО установлено 2–5-кратное превышение концентраций Ba над фоновым уровнем региона. Содержание Sr, напротив, по всему исследованному разрезу исследованных отложений ниже или повторяет уровень геохимического фона ДО Карелии (табл. 1 и 2).

Содержание Li в изученных ДО значимо коррелирует с концентрациями Cr, Ni, V, Cu, Co, W и Mo (рис. 3). Аналогичная ситуация наблюдается по Rb, который имеет почти полную функциональную зависимость с содержанием Li в озерных осадках Петрозаводска ($R = 0,99$ при $p < 0,01$). Хотя аномально высокие концентрации обоих элементов приходятся на глубину ДО от 0 до 20 см (табл. 2), небольшие пики их содержания в изученной толще сапропеля отмечены на глубине 36–40 см, где встречаются аномалии Co, Zn, Cu, Cd, Mo и Pb. Интересно, что распределение в ДО озера Ламба щелочноземельных элементов Ba и Sr, которые, так же как и щелочные металлы, очень активны в геологической среде [Интерпретация..., 2001], коррелирует с поведением в осадках Zn ($R_{Ba-Zn} = 0,56$ и $R_{Sr-Zn} = 0,82$ при $p < 0,05$). А наибольшие пики Ba и Sr отмечены в осадках глубины 6–10 см, где зафиксированы аномально высокие концентрации V, Ni, Cr и C.

ДО озера Ламба по сравнению с речными осадками города Петрозаводска [Слуковский,

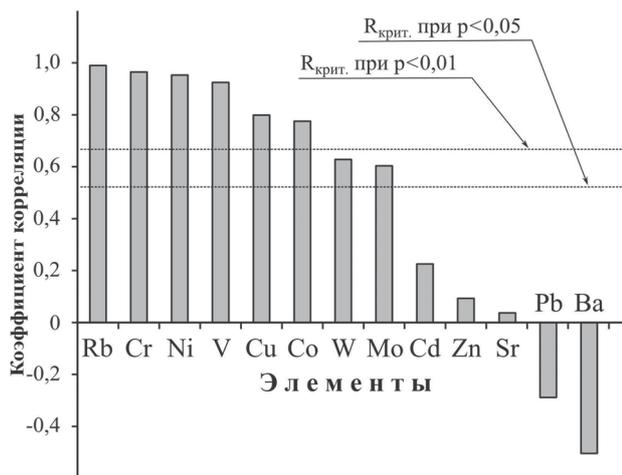


Рис. 3. Корреляция содержания Li с концентрациями различных микроэлементов в ДО озера Ламба

Светов, 2016] более обогащены Mo (по всему разрезу), Zn (глубина осадков 0–50 см), Pb (11–40 см), Ba (31–45 см), V, Ni, Cu (все 0–15 см), а также Cr, Li, Co (все 6–10 см). В случае остальных глубин указанных микроэлементов отмечается одинаковый уровень или уровень ниже содержания этих металлов в речных ДО. Концентрации Rb, Sr, Cd и W имеют значения ниже или на уровне содержания их в речных осадках по всему изученному разрезу. Кроме того, отмечается, что в ДО озера Ламба на глубине от 0 до 20 см по сравнению с другим малым водоемом города Петрозаводска, озером Четырехверстным, более интенсивно накапливались V (4–23-кратное превышение), Ni (2–9), Cu (4–7), Zn (2–3), Mo (2–3) [Синькевич, Экман, 1995].

Обсуждение

Согласно данным [Синькевич, Экман, 1995], изученные отложения озера Ламба относятся к типу черных и темно-серых сапропелей, которые имеют значительное распространение на территории южной Карелии: в районе локализации крупной протерозойской структуры – Онежской мульды. Особенностью этих озерных образований является обогащение железом (как двух-, так и трехвалентным), представленным лимонитом, гидротроилитом, вивианитом и др. На рисунке 4 показаны эти минералы из ДО озера Ламба, содержащие в своем составе также Ca, P и Mn, что видно по спектрам указанных элементов. При этом фосфор – основной элемент в структуре вивианита, который образуется при восстановлении железа, что указывает на аналогичный характер среды, в которой происходило формирование изученных ДО.

Сильный разброс значений суммарного Fe в сапропелевых илах петрозаводского озера от

9 до 24 % (рис. 2, г) не позволяет однозначно классифицировать данные осадки, однако они близки к железистым сапропелям с повышенным содержанием органического вещества, образованным в условиях восстановительной среды [Синькевич, Экман, 1995]. В свою очередь, приведенная в литературе классификация [Минерально-сырьевая..., 2006] допускает отнесение изученных ДО озера Ламба к железистым (лимонитовым) сапропелям с зольностью до 85 % и содержанием лимонита более 10 %, однако для подтверждения этого факта необходимо провести детальный минералогический анализ исследованных отложений.

Содержание Si, Al, Ca, P и Mg позволяет считать осадки озера Ламба железистыми илами с высоким содержанием силикатно-коллоидного комплекса, которые также образуются в восстановительных условиях [Синькевич, Экман, 1995]. Судя по характеру распределения различных компонентов в озерных осадках, вероятно, что накопление в толще ДО Si, Al, Mg, Na, Ti и органического вещества происходило иным путем, чем накопление Fe и сопутствующих ему главных элементов (Ca, P, Mn). Резкое увеличение концентраций Al, Na, K, Ti и Mg от глубины 50–55 см до самого верхнего слоя изученных ДО осадков озера Ламба является следствием процессов химического и механического выветривания, которым мог быть подвергнут первоначальный материал отложений. Этот тезис подтверждается значимым положительным уровнем корреляции MgO ($R = 0,91$ при $p < 0,01$), K_2O (0,89), Al_2O_3 (0,88), TiO_2 (0,87) и Na_2O (0,81) с алюмокремниевым модулем, отражающим процесс выветривания осадочных образований. На рисунке 5 показана треугольная диаграмма, используемая в «классической» геологии для характеристики направления выветривания пород, являющихся источником материала для терригенных образований [Интерпретация..., 2001]. Учитывая, что выветривание, в том числе выветривание в водной среде (гальмиролиз), – процесс динамичный, показанная тройная диаграмма может быть применима при изучении самих осадочных образований, в том числе ДО водных объектов. Таким образом, показанный график, на котором тренд выветривания минералов, иллюстрирующий, что первичный (свежий) материал верхних слоев исследованных ДО озера Ламба обладает большей степенью выветренности по сравнению с материалом нижележащих слоев осадков, позволяет разделить всю изученную колонку на три самостоятельные группы осадочного материала (обозначения представлены в подписи к рис. 5). Накопление

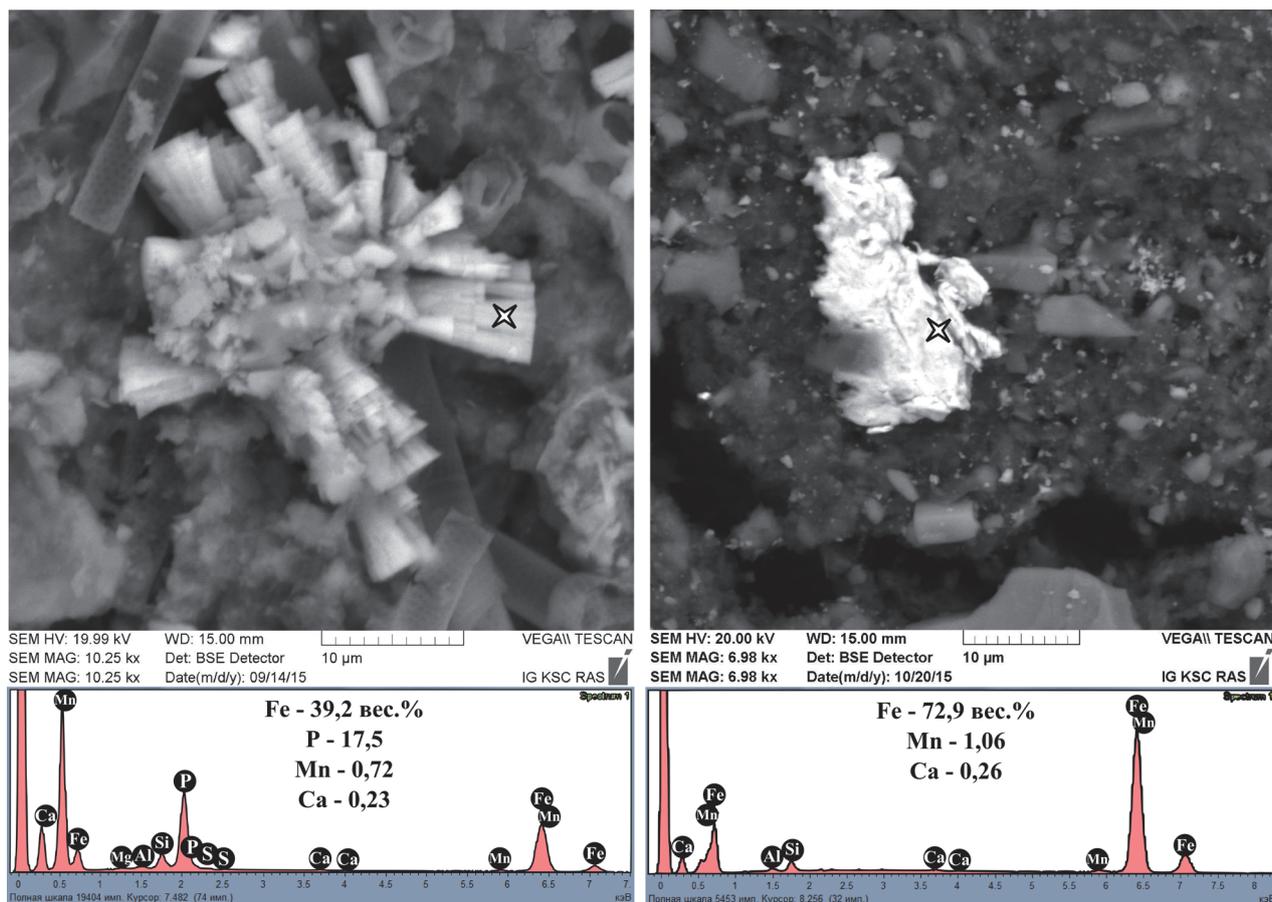


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения минералов вивианита (слева) и лимонита (справа) и их спектры в отмеченных звездочками участках

в ДО озера Ламба Fe, P, Mn и Ca слабо связано с этим процессом, подтверждением этому является антагонизм пары Al-P, о чем сообщалось выше. Кроме того, на характер распределения главных элементов в толще изученных озерных отложений могут оказывать влияние внутриводные биогеохимические процессы, связанные с вертикальной миграцией элементов по разрезу, переносом вещества гидробионтами, воздействием pH и Eh среды и др.

Аккумуляция кремнезема в толще осадков озера Ламба подчинена, скорее всего, двум различным факторам: накоплению минерального кремния в виде кварца, опала и других Si-минералов и накоплению биогенного кремния в виде створок диатомовых водорослей, в большом количестве присутствующих в ДО городского водоема. Однако влияние первого фактора имеет больший вес, что отражено в значимой корреляционной связи SiO_2 с Al_2O_3 , TiO_2 и Na_2O (табл. 3). При этом органическое вещество (ППП) отрицательно коррелирует как с кремнеземом, так и с некоторыми другими главными элементами (табл. 3), которые привносились в ДО извне во время процесса

осадконакопления. Вероятно, это говорит о превалировании в толще озерных отложений автохтонной органики над аллохтонной. В то же время отсутствие какой-либо связи ППП с концентрацией фосфора ($R = -0,38$ при $p > 0,05$), а также значимая корреляция фосфора и суммарного Fe (табл. 3) всецело объясняются вовлечением P в процессы образования железистых минералов. Дополнительным доказательством этого факта служит присутствие в изученных отложениях кристаллов вивианита (водного фосфата железа $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), в составе которого фосфор достигает 17,5 вес. % (рис. 4). Учитывая, что визуальный анализ распределения вивианита в изученных отложениях озера Ламба показал неравномерное образование этого минерала в озерных осадках во время их накопления, в частности максимальное скопление синей охры приходится на глубину 36–40 см, где наблюдается резкое изменение концентраций Fe, P, Mn и отчасти Ca (рис. 2; табл. 2), стоит предположить связь этого явления со сменой редокс-потенциала исследованных отложений, так как образование вивианита происходит

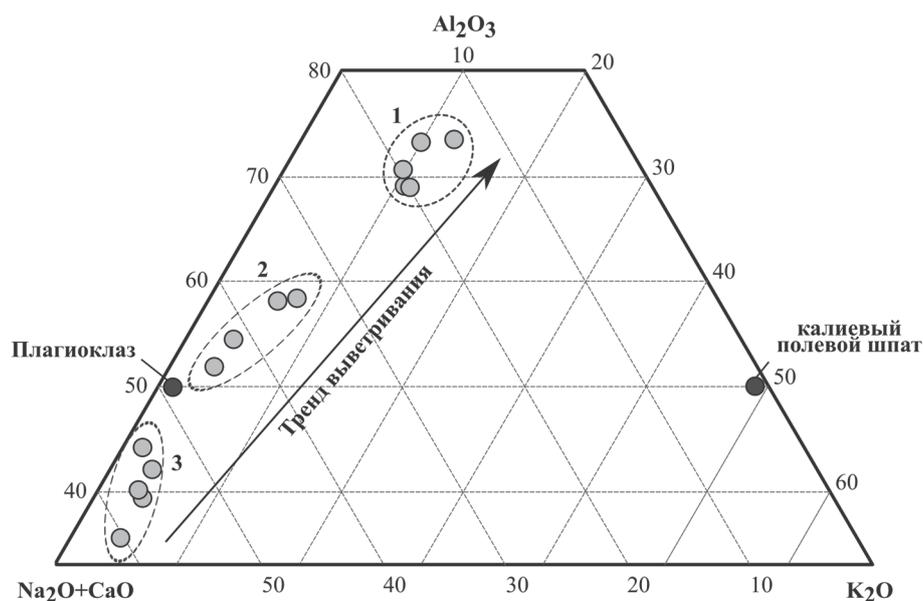


Рис. 5. Треугольная диаграмма соотношения К-Al- (Na+Ca) в ДО озера Ламба (1 – верхние слои (0–10 см), 2 – средние слои (11–30 см), 3 – нижние слои озерных осадков (31–55 см)). Значения К, Al и суммы Na и Ca даны в процентах от суммы всех главных элементов, указанных на диаграмме

в восстановительной среде при восстановлении железа с трех- до двухвалентного [Синькевич, Экман, 1995; Субетто, 2009]. Известно [Даувальтер, Ильяшук, 2007], что растворимость соединений Fe со степенью окисления 2+ на четыре порядка выше, чем со степенью окисления 3+. Это и привело к уменьшению содержания суммарного Fe, а также Mn и P, которые обладают разной степенью окисления в зависимости от изменения окислительно-восстановительных условий, в средней части разреза ДО оз. Ламба в диапазоне глубины осадков от 5 до 40 см. Присутствие вивианита, в котором Fe имеет степень окисления 2+, в указанной толще озерных отложений городского озера может служить своеобразным минеральным индикатором описанного выше процесса растворения соединений Fe, Mn, P и других макрокомпонентов. Дальнейшие исследования Eh и форм нахождения химических элементов петрозаводских городских осадков позволят внести уточняющие сведения в прояснение природы описываемых явлений.

Анализ взаимоотношения гранулометрического состава, индикатором которого может служить Li [Loring, 1990; Слуковский, 2015], и модуля степени дифференциации осадочного материала, показывает, что с увеличением глубины изучаемого осадочного разреза увеличивается степень дифференциации озерных отложений и, как следствие, разнообразие материала (рис. 6). Это свидетельствует

о большей переработке первичного материала, имеющего больший возраст и смешанный гранулометрический состав, в ходе выветривания и гальмиролиза (подводного выветривания). В свою очередь, распределение тонкодисперсной фракции ДО, с которой, по данным канадских исследователей, коррелирует содержание Li [Loring, 1990], контролируется степенью химического выветривания, с которым связано разрушение первичных плагиоклазов (значения $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ и K_2O), и увеличением доли глинистой составляющей материала – Al_2O_3 (рис. 5). В глинистых минералах и глинистых частицах, образованных вследствие выветривания, аккумулируется основная масса щелочных элементов, в том числе Li, Rb, Cs, имеющих между собой высокий уровень корреляции – от 0,87 до 0,97 (при $p < 0,01$) [Поляков, Зарубина, 2014]. Также следует учитывать, что тонкодисперсная фракция могла существенно обогащать самые верхние слои ДО озера Ламба вследствие существенной роли зольных пылевых выбросов промышленных предприятий города, способствующих формированию в урбанизированной среде так называемых техногенных илов [Янин, 2009, 2013].

Техногенность изученных ДО петрозаводского озера Ламба иллюстрируется уровнем накопления в них тяжелых металлов как наиболее опасных токсикантов природной среды. Помимо того, что город Петрозаводск – крупный транспортный узел с населением 270 тыс.

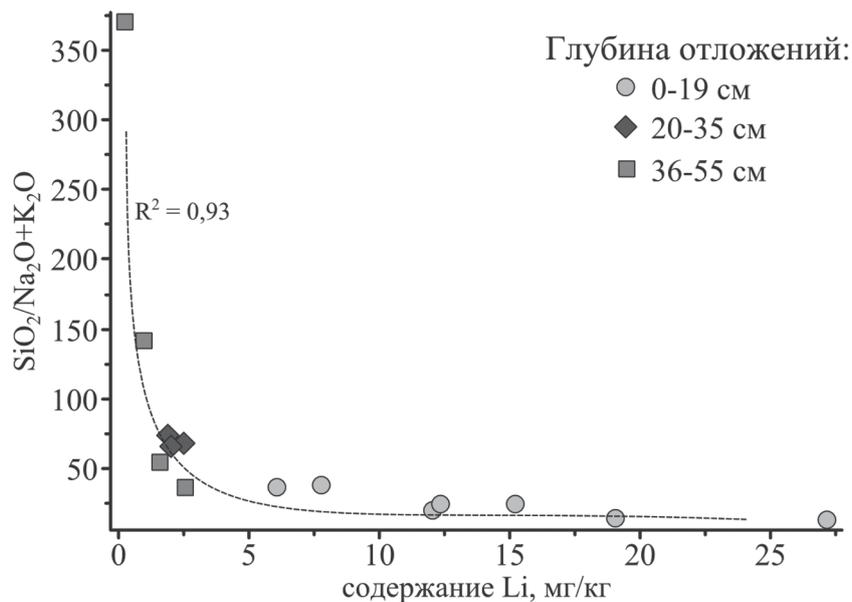


Рис. 6. График взаимосвязи концентрации Li в изучаемых ДО и значений модуля степени дифференциации осадочного материала (СДМ)

человек, здесь функционировали и функционируют многочисленные промышленные предприятия, такие как Онежский тракторный завод, «Петрозаводскмаш» (в том числе литейный завод с аналогичным названием), станкостроительный завод «Металлист», электроремонтный завод «Коммунальник», «Стройтехника», судостроительный завод «Авангард», Онежский судостроительно-судоремонтный завод, молочный комбинат «Славмо», рыбокомбинат, фабрика валяной обуви (артель «Пимокатка»), теплоцентраль, несколько электростанций, многочисленные предприятия лесной промышленности и камнеобработки и др. [Промышленность...].

Одним из источников поступления V, Ni и Cr в экосистему городского водоема, вероятно, являются выбросы Петрозаводской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), расположенной в 500 м от водного объекта (рис. 1), поскольку из литературы [Teng et al., 2006; Гоголашвили, Гарифзянов, 2007] известно, что повышенным содержанием этих элементов характеризуются выбросы любых теплоэнергетических предприятий, использующих в качестве топлива мазут. И хотя ветра юго-восточного и восточно-юго-восточного направления составляют в г. Петрозаводске 7–8 % от ветров всех направлений [Слуковский, Медведев, 2015], крайне высокий уровень обогащения ДО озера Ламба этими поллютантами легко маркирует негативное влияние выбросов ТЭЦ на химический состав верхних горизонтов изученных осадков [Саев и др., 1990]. Учитывая, что Петрозаводская

ТЭЦ была введена в эксплуатацию в 1976 году (уже более 40 лет назад) и вплоть до конца 1997 года работала исключительно на мазуте [Рыбаков, 1999], налицо эффект длительного воздействия этого предприятия на экосистему водного объекта, выразившийся в аккумуляции V и сопутствующих ему Ni и Cr в ДО озера на глубине 0–20 см. Заметное снижение концентраций этих тяжелых металлов от слоя 5–10 см к слою 0–5 см – в 2,6 раза для Ni и 3,2 раза по V и Cr – следует связать с переходом ТЭЦ в начале 2000-х годов на использование природного газа в качестве основного топлива, хотя мазут, согласно сведениям на официальном сайте предприятия [Петрозаводская...], остается в резервном использовании. Необходимо также отметить, что рост концентраций V отмечается в диапазоне глубин ДО оз. Ламба от 55 до 20 см, что может быть связано как с вхождением этого металла в состав пылевых выбросов и выбросов других промышленных предприятий Петрозаводска [Рыбаков и др., 2013], так и с усиленными эрозионными процессами во время активного освоения района Сулажгоры в последние 100 лет, учитывая, что V может быть связан с природными минеральными образованиями. При этом фактор влияния ТЭЦ на экосистему озера в последние несколько десятков лет кардинально изменил уровень накопления этого металла в изученных осадках, что отражено в результатах, описанных выше.

Таким образом, зная время начала функционирования ТЭЦ и, соответственно, время

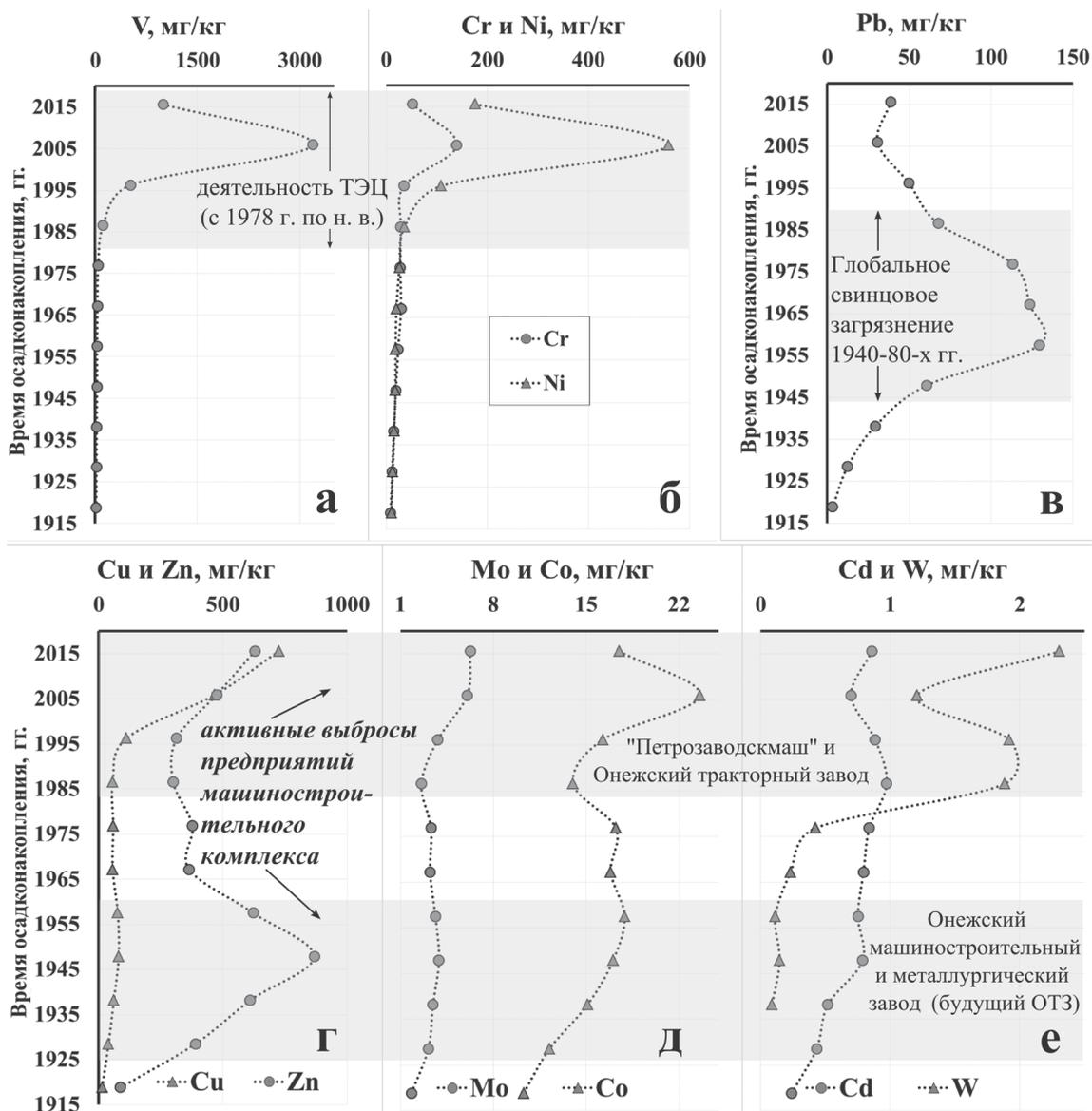


Рис. 7. Распределение концентраций V, Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, Mo, Co, Cd и W по времени их накопления в ДО озера Ламба

начала выбросов этого предприятия в окружающую среду до момента отбора проб ДО оз. Ламба, можно предположить, что толща озерных осадков от 0 до 20 см, где зафиксированы anomalously высокие концентрации V, Ni и Cr, накопилась приблизительно за 40 лет (рис. 7, а, б). Следовательно, скорость осадконакопления в озере Ламба составляет ориентировочно около 5 мм/год, что более чем в 5 раз превышает среднюю скорость седиментации осадочного материала на дне малых озер территории Фенноскандии [Субетто, 2009; Даувальтер, 2012]. Данный факт может объясняться значительным влиянием городской среды на процесс переноса и аккумуляции осадочного материала в водной среде,

а также интенсивной эвтрофикацией водного объекта, учитывая близость сельхозугодий бывшего плодово-ягодного питомника, действовавшего в 500 метрах от озера в советское время. С подобным явлением высокой скорости осадконакопления в пределах локальной урбанизированной территории по сравнению с «фоновой» скоростью – средней для региона исследований – столкнулись седиментологи из Татарстана, которые выяснили, что накопление ДО в городских водных объектах Казани происходит в 2–6 раз быстрее, чем в озерах республики в целом [Иванов и др., 2011а, б].

Допуская, что скорость осадконакопления в петрозаводском озере Ламба была относительно постоянной, получим ориентировочный

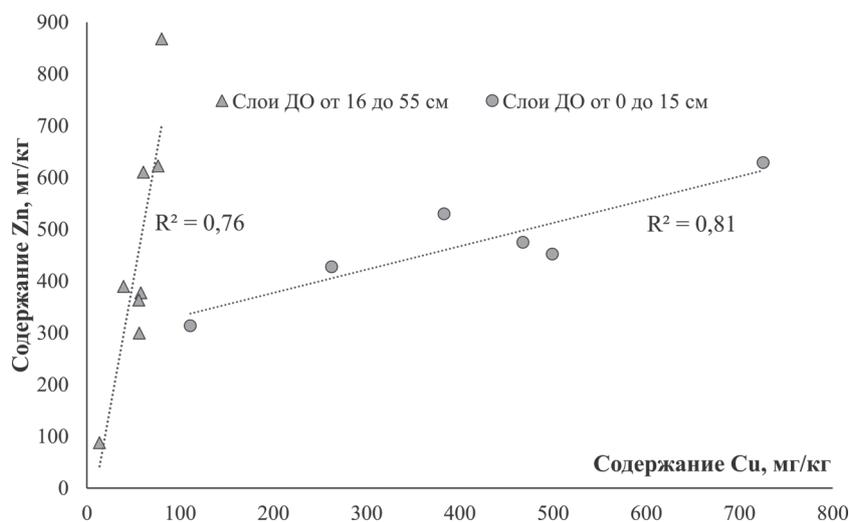


Рис. 8. Соотношение концентраций Cu и Zn в ДО оз. Ламба

возраст самого нижнего слоя (50–55 см) равным около 105 лет, а вся исследованная толща ДО, соответственно, образовалась с 1909 по 2015 гг. Данное обстоятельство объясняет факт экстремально высоких концентраций Pb в ДО Ламба на глубине от 21 до 35 см (рис. 7, в), так как эти аномалии, скорее всего, приурочены к периоду с 1940-х до 1980-х годов, когда во многих странах мира (в СССР/России до начала 2000-х годов) в моторное топливо добавлялся тетраэтилсвинец $Pb(CH_3CH_2)_4$, служивший как антидетонирующая присадка для бензина [Thomas, 1995; Komárek et al., 2008]. Таким образом, с начала XX века уровень обогащения Pb петрозаводских осадков к середине прошлого столетия увеличился в 40 раз, что находит отражение в исследованиях ДО озер соседних с нами Мурманской области и Финляндии, а также Северной Америки [Norton et al., 1990; Keinonen, 1992; Даувальтер, 2006; Даувальтер, Кашулин, 2014]. Пик общемировых выбросов свинца в атмосферу пришелся на 1960–70-е годы [Nriagu, 1990; Thomas, 1995]. С 1976 года началось постепенное вытеснение Pb-содержащего топлива, которое было завершено к 1986 году. В России этилированный бензин был запрещен с 15 ноября 2002 года [Постановление...]. Описанные тенденции прослеживаются в распределении концентраций Pb в ДО города Петрозаводска на глубинах от 0 до 25 см. Содержание этого металла в самых современных отложениях (0–10 см) достигает уровня 1930-х годов – момента, когда только началось активное использование свинцовых добавок по всему миру. Однако фоновый уровень Pb для изученных ДО (3,3 мг/кг) пока недостижим ввиду высокого уровня накопления этого загрязнителя в почвенном покрове

водосборной площади озера Ламба, тесно связанной с территорией города Петрозаводска [Крутских, Косинова, 2014; Новиков, 2014].

Работа двух крупных машиностроительных предприятий (Онежского тракторного завода и «Петрозаводскмаша»), специализирующихся на производстве машин и оборудования для нужд лесоперерабатывающей, атомной, нефтехимической и целлюлозно-бумажной промышленности и имеющих собственное литейное производство, заметно отражена в геохимии изученных ДО озера Ламба. Экстремально высокие концентрации Zn (389,5–867,9 мг/кг), Cu (39,4–80,3), Co (12,2–17,9), Mo (3,1–3,9), W (0,09–0,15) и Cd (0,43–0,79) в озерных осадках на глубинах от 31 до 50 см соответствуют рассчитанному периоду времени с начала 1920-х до середины 1950-х годов (рис. 7, г–е). Тогда будущий Онежский тракторный завод, перейдя в руки советской власти, перепрофилировался в предприятие по ремонту паровозов и вагонов, изготовлению запасных частей для них, а в дальнейшем – производству дорожных машин и продукции лесного машиностроения [Онежский...]. Анализ химического состава почвогрунтов бывшей промышленной площадки Онежского тракторного завода, расположенной в центральной части г. Петрозаводска, показал, что все указанные элементы, кроме Cd, имеют значительные превышения над ПДК и местным геохимическим фоном [Рыбаков и др., 2013]. Кроме того, эти тяжелые металлы входят в единую техногенную ассоциацию элементов (вместе с Cd), связанных с выбросами промышленного предприятия [Рыбаков, Веселкова, 2015]. Сохраняющиеся высокие концентрации Zn, Mo, Cd в толще ДО на глубинах от 0 до 30 см – следствие активной деятельности

Онежского тракторного завода вплоть до конца 2000-х годов, когда предприятие было признано банкротом. Кроме того, на повышенный фон этих тяжелых металлов также повлияли выбросы функционирующего с середины 1960-х годов прошлого столетия по настоящее время ОАО «Петрозаводскмаш», расположенного менее чем в трех километрах от озера Ламба [Петрозаводскмаш...]. Экстремальные значения содержания Cu (до 727 мг/кг) в самых верхних слоях изученной толщи ДО оз. Ламба, скорее всего, связаны с деятельностью литейного производства «Петрозаводскмаша». Взаимоотношение Cu и Zn как основных компонентов многих важнейших литейных сплавов [Расчет..., 2000] иллюстрирует тесную связь этих тяжелых металлов, поступивших в экосистему петрозаводского озера в различное время от двух разных техногенных источников, но имеющих общую природу загрязняющих выбросов (рис. 8). При этом авторы публикации весьма четко понимают, что увязка выбросов определенных тяжелых металлов и их накопления в толще современных озерных отложений г. Петрозаводска носит условный характер, учитывая тот факт, что предприятия машиностроительного и энергетического комплекса имеют приблизительно один набор загрязняющих веществ [Саэт и др., 1990]. Кроме того, часть металлов, например халькофильные элементы Cd и Pb, могут поступать в водную среду в результате трансграничного переноса поллютантов через атмосферу планеты [Даувальтер, 2006].

Следует также отметить, что разработанная ранее концепция определения техногенного статуса поллютантов с использованием концентраций щелочных металлов (Li и Rb) как индикаторов антропогенного влияния на городские речные системы [Слуковский, Светов, 2016] работает и в случае с урбанизированным водоемом. К указанным элементам добавляются щелочноземельные металлы Ba и Sr. При этом щелочные металлы могут выступать индикаторами техногенного накопления в изученных ДО Cr, Ni, V, Cu, Co, W и Mo, а щелочноземельные – преимущественно Zn. Остается невыясненным только момент отсутствия связи Pb и Cd с обозначенными щелочными и щелочноземельными металлами, при этом между собой они имеют коэффициент корреляции $R_{Cd-Pb} = 0,58$ (при $p < 0,05$), что может свидетельствовать об их едином пути поступления в водный объект, связанном как с выбросами автомобильного транспорта [Саэт и др., 1990], так и с обозначенным выше дальним переносом загрязняющих веществ [Даувальтер, 2006]. При этом

не стоит исключать значительное природное влияние в накоплении Cd в озерных отложениях г. Петрозаводска, что ранее отмечалось при изучении речных осадков города [Слуковский, 2014], а также ДО литоральной зоны северной части Ладожского озера [Ивантер и др., 2016].

Выводы

Таким образом, результаты геохимического исследования 55-сантиметровой колонки ДО малого озера Ламба выявили следующие особенности накопления данной осадочной формации:

- Изученные озерные отложения по содержанию главных элементов (Fe, ППП, Mn) относятся к железистым (лимонитовым) сапропелям с повышенным содержанием органики.
- Распределение в толще осадков озера Ламба Al, Na, K, Mg и Ti, концентрации которых существенно увеличиваются от нижних слоев к верхним, связано с процессом дифференциации осадочного материала, зависящего от гранулометрического состава осадков и химического выветривания первичных минералов. Это подтверждается значимым положительным уровнем корреляции указанных элементов с алюмокремниевым модулем.
- Концентрации Fe, а также связанных с этим элементом P, Mn и Ca, зависят от окислительно-восстановительных условий на дне озера, поскольку растворимость соединений Fe, а также Mn и P сильно зависит от их степени окисления, меняющейся в результате смены Eh-условий. Образование кристаллов вивианита, в котором Fe имеет степень окисления 2+, можно считать индикатором описанного процесса.
- Содержание большинства тяжелых металлов в толще осадков озера Ламба превышает фоновый уровень накопления этих элементов в водных объектах Республики Карелия, а также их концентрации в почвенном покрове и речных ДО города Петрозаводска.
- Экстремально высокий уровень накопления V, Cr, Ni в верхних слоях ДО оз. Ламба (0–20 см) указывает на значительное влияние Петрозаводской ТЭЦ.
- Аномально высокие концентрации Pb в слоях осадков на глубине от 0 до 50 см связаны с повсеместным загрязнением окружающей среды этим тяжелым металлом вследствие его поступления от выбросов автомобильного транспорта, а также трансграничного переноса через атмосферу планеты.

- Распределение концентраций Co, Cu, Zn, Sr, Mo, Sn отражает воздействие на экосистему озера Ламба выбросов предприятий – Онежского тракторного завода и «Петрозаводскмаш».
- Примерная скорость осадконакопления в озере составляет 0,5 см в год, что в 5 и более раз превышает среднюю скорость осадконакопления на территории Республики Карелия и Мурманской области. Общий ориентировочный возраст исследованной 55-сантиметровой толщи ДО озера Ламба составляет приблизительно 105 лет.
- Геохимические особенности накопления в исследованных осадках Li и Rb свидетельствуют об их активности в геосреде в периоды максимального накопления тяжелых металлов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, W) в озерных отложениях города, что подтверждает концепцию об использовании щелочных металлов в качестве индикаторов техногенного статуса загрязнителей водной среды.

Авторы выражают признательность сотрудникам Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН А. И. Михайловой, В. Л. Утицыной, М. В. Эховой, А. С. Парамонову и С. В. Бурдюху за помощь в проведении аналитических исследований. Также авторы благодарят анонимных рецензентов, чьи ценные замечания и рекомендации, несомненно, улучшили качество публикуемого материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00026 мол_а, а также частично за счет средств федерального бюджета на выполнение государственных заданий по темам ГР № АААА-А16–116020410116 и № 0221-2014-0033.

Литература

Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 109 с.

Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35,36. Том 2: Отчет о научно-исследовательской работе / Исполн. О. В. Томилина, С. Ф. Паламчук, Э. Я. Яхнин, А. И. Егоров. СПб., 2004. 146 с.

Гоголашвили Э. Л., Гарифзянов А. Р. Проблемы анализа ванадия в сточных водах тепловых электростанций // Энергетика Татарстана. 2007. № 3. С. 60–63.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова // Геохимия. 2006. № 2. 237–240. doi: 10.1134/S0097807810040093

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

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник КНЦ РАН. 2014. № 2 (17). С. 106–120.

Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985. 511 с.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Методика оценки природной и техногенной составляющих тяжелых металлов в водоемах урбанизированных территорий // Георесурсы. 2011а. № 5 (41). С. 27–31.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011б. № 2 (38). С. 46–48.

Ивантер Э. В., Слуковский З. И., Дудакова Д. С., Медведев А. С., Светов С. А. Свидетельства циркононовой природы кадмиевых аномалий в донных отложениях литорали северной части Ладожского озера // ДАН. 2016. Т. 468, № 5. С. 562–565.

Интерпретация геохимических данных / Ред. Е. В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Комулайнен С. Ф. Фитоперифитон в водоемах г. Петрозаводска (Республика Карелия) // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 2. С. 43–50.

Крутских Н. В., Косинова И. И. Методика трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск) // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Геология. 2014. № 3. С. 95–97.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Новиков С. Г. Радиальное распределение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах г. Петрозаводска на землях общего пользования // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/115-12088> (дата обращения: 14.02.2014).

Онежский тракторный завод / Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежский_тракторный_завод (дата обращения: 13.02.2016).

Петрозаводская ТЭЦ // ТКК-1. Энергия Северо-Запада [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tgc1.ru/?id=164> (дата обращения: 13.02.2016).

Петрозаводскмаш // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://>

ru.wikipedia.org/wiki/Петрозаводскмаш (дата обращения: 13.02.2016).

Поляков Д. М., Зарубина Н. В. Накопление щелочных и щелочноземельных элементов в субколлоидной фракции донных осадков на геохимическом барьере река-море // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 573–578. doi: 10.7868/S0321059614060169

Постановление ГД ФС РФ от 15.11.2002 № 3302-III ГД о проекте федерального закона № 209067-3 «Об ограничении оборота этилированного бензина в Российской Федерации» // Законы России [Электронный ресурс]. URL: http://www.lawrussia.ru/texts/legal_149/doc149a777x242.htm (дата обращения: 13.02.2016).

Потахин М. С. Морфологические особенности водоемов г. Петрозаводска // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Матер. IV школы-конф. мол. ученых с междунар. участием (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск, 2011. С. 180–183.

Промышленность Петрозаводска // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленность_Петрозаводска (дата обращения 10.09.2017).

Расчет выбросов загрязняющих веществ от литейных цехов: Методическое пособие по выполнению практической работы по курсу «Промышленная экология» для студентов специальности 320700 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / Сост. Л. И. Бондалетова, В. Т. Новиков, Н. А. Алексеев. Томск: Изд. ТПУ, 2000. 34 с.

Рыбаков Д. С. Первые данные дендрогеохимического определения многолетней динамики загрязнения Петрозаводска // Вопросы геологии и экологии Карелии: По матер. конф. молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 51–57.

Рыбаков Д. С., Веселкова С. А. Ассоциации химических элементов в загрязненных почвогрунтах бывшей промышленной площадки // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Матер. 4-й науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 30 сентября – 2 октября 2015 г.). Воронеж: Научная книга, 2015. С. 191–194.

Рыбаков Д. С., Крутских Н. В., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б., Слукровский З. И., Кричевцова М. В., Лазарева О. В. Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. СПб.: ЭлекСис, 2013. 130 с.

Саэт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Синькевич Е. И., Экман И. М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

Слукровский З. И. Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия) // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23, № 4. С. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Слукровский З. И. Эколого-геохимический анализ состояния донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2014. 24 с.

Слукровский З. И., Медведев А. С. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламба (г. Петрозаводск, Республика Карелия) // Экологическая химия. 2015. № 1. С. 56–62.

Слукровский З. И., Светов С. А. Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 38–45.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции: Науч. моногр. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

Янин Е. П. Особенности гранулометрического состава русловых отложений малой реки в зоне влияния промышленного города // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 3. С. 69–74.

Янин Е. П. Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка) // Экологическая экспертиза. 2013. № 1. С. 2–195.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // The Science of the Total Environment. 1992. Vol. 113, no. 3. P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrastný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review // Environment International. 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j.envint.2007.10.005

Loring D. H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // Marine Chemistry. 1990. Vol. 29. P. 155–168. doi: 10.1016/0304-4203(90)90011-Z

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments // Sources, Deposition and Capony Interactions. V. III, Acidic Precipitation. N. Y.: Springer-Verlag. 1990. P. 73–101. doi: 10.1007/978-1-4612-4454-7_4

Nriagu J. O. The rise and fall of leaded gasoline // Science of The Total Environment. 1990. Vol. 92. P. 13–28. doi: 10.1016/0048-9697(90)90318-O

Teng Y., Ni S., Zhang C., Wang J., Lin X., Huang Y. Environmental geochemistry and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China // Chinese Journal of Geochemistry. 2006. Vol. 25, no. 4. P. 379–385.

Thomas V. M. The elimination of lead in gasoline // Annual Review of Energy and the Environment. 1995. Vol. 20. P. 301–324.

Поступила в редакцию 05.04.2017

References

- Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of bottom sediments of lakes]. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2012. 242 p.
- Dauval'ter V. A. Khal'kofil'nye elementy (Hg, Cd, Pb, As) v donnykh otlozheniyakh vodnykh ob'ektov vodosbora Belogo morya v predelakh Kol'skogo poluostrova [Chalcophylic elements (Hg, Cd, Pb, As) in bottom sediments of water bodies of the White Sea catchment within the Kola Peninsula]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 2006. No. 2. P. 237–240. doi: 10.1134/S0097807810040093
- Dauval'ter V. A., Il'yashuk B. P. Usloviya obrazovaniya zhelezomargantsevykh konkretnykh v donnykh otlozheniyakh ozer v predelakh Baltiiskogo kristallicheskogo shchita [Conditions of ferromanganese nodules formation in the bottom sediments of lakes in the Baltic Shield]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 2007. No. 6. P. 680–684.
- Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii sistemy reki Pasvik v usloviyakh global'nogo i lokal'nogo zagryazneniya [Chemical composition of the bottom sediments of the Pasvik river system under global and local pollution]. *Vestnik KNTs RAN [Herald of KarSC of RAS]*. 2014. No. 2 (17). P. 106–120.
- Efremova S. V., Stafeev K. G. Petrokhimicheskie metody issledovaniya gornyykh porod [Petrochemical methods for rocks research]. Moscow: Nedra, 1985. 511 p.
- Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i provedenie ope-rezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeol'karty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35,36 [Geochemical mapping of the north of the European territory of Russia within the framework of the international program Ecogeochemistry of the Barents Region and conducting an advanced stage of compiling the geochemical basis of the State Geolokarta-1000 of the third generation into the sheets R-35, 36]. Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote [Research Report]. Eds. O. V. Tomilina, S. F. Palamchuk, E. Ya. Yakhnin, A. I. Egorov. St. Petersburg, 2004. Vol. 2. 146 p.*
- Gogolashvili E. L., Garifzyanov A. R. Problemy anali-za vanadiya v stochnykh vodakh teplovykh elektrostantsii [Problems of vanadium analysis in wastewater from thermal power plants]. *Energetika Tatarstana [Power Engineering in the Republic of Tatarstan]*. 2007. No. 3. P. 60–63.
- Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Metodi-ka otsenki prirodnoi i tekhnogennoi sostavlyayushchikh tyazhelykh metallov v vodoemakh urbanizirovannykh ter-ritorii [A method for assessing natural and man-made components of heavy metals in water bodies of urban areas]. *Georesursy [Georesources]*. 2011a. No. 5 (41). P. 27–31.
- Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Otsen-ka skorosti osadkonakopleniya v ozerakh Kazani i Prikazan'ya [Assessment of the sedimentation rate in the lakes of Kazan and adjacent territories]. *Georesursy [Georesources]*. 2011b. No. 2 (38). P. 46–48.
- Ivanter E. V., Slukovskii Z. I., Dudakova D. S., Med-vedev A. S., Svetov S. A. Svidetel'stva tsirkonovoi prirody kadmievyykh anomalii v donnykh otlozheniyakh litorali severnoi chasti Ladozhskogo ozera [Evidence for the zircon origin of cadmium anomalies in the bot-tom sediments from the littoral zone of the northern part of Lake Ladoga]. *DAN [Doklady Earth Sciences]*. 2016. Vol. 468, no. 5. P. 562–565.
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh [Interpre-tation of geochemical data]. Ed. E. V. Sklyarova. Mos-cow: Intermet Inzhiniring, 2001. 288 p.*
- Komulainen S. F. Fitoperifiton v vodoemakh g. Petro-zavodska (Respublika Kareliya) [Phytoperiphyton in the reservoirs of Petrozavodsk (Republic of Karelia)]. *Tru-dy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2014. No. 2. P. 43–50.
- Krutsikh N. V., Kosinova I. I. Metodika transfor-matsii prirodnoi sredy po rezul'tatam ekologo-geokhi-micheskikh issledovaniy (na primere g. Petrozavodsk) [A method of natural environment transformation based on the results of ecological and geochemical research (the case of Petrozavodsk)]. *Vestnik Voronezhskogo gos. univ. Ser. Geologiya [Proceed. of Voronezh St. Univ. Geology Ser.]*. 2014. No. 3. P. 95–97.
- Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya [Mi-neral and raw material base of the Republic of Kare-lia]. Kniga 2: Nemetallicheskie poleznye iskopaemye. Podzemnye vody i lechebnye gryazi [Vol. 2. Nonmetallic Minerals. Underground Waters and Therapeutic Mud]. Petrozavodsk: Karelia, 2006. 356 p.*
- Novikov S. G. Radial'noe raspredelenie valovogo soderzhaniya i podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh g. Petrozavodska na zemlyakh obshchego pol'zovaniya [Radial distribution of gross content and mobile forms of heavy metals in the public lands soils of Petrozavodsk]. *Sovremennye problemy nauki i obra-zovaniya [Modern Problems of Science and Ed.]*. 2014. No. 1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12088> (accessed: 14.02.2014).
- Onezhskii traktornyi zavod [The Onezhsky trac-tor plant]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Onezhskii_traktornyi_zavod (ac-cessed: 13.02.2016).*
- Petrozavodskaya TETs [The Petrozavodsk heating plant]. TGK-1. Energiya Severo-Zapada [TGK-1. Energy of the North-West]. URL: <http://www.tgc1.ru/?id=164> (accessed: 13.02.2016).*
- Petrozavodskmash [The Petrozavodskmash plant]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Petrozavodskmash> (accessed: 13.02.2016).*
- Polyakov D. M., Zarubina N. V. Nakoplenie shche-lochnyykh i shchelochnozemel'nykh elementov v subkol-loidnoi fraktsii donnykh osadkov na geokhimicheskome bar'ere reka-more [Accumulation of alkaline and alka-line-earth elements in the subcolloid fraction of bottom sediments at the geochemical river-sea barrier]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 573–578. doi: 10.7868/S0321059614060169*
- Postanovlenie GD FS RF ot 15.11.2002 № 3302-III GD o proekte federal'nogo zakona № 209067-3 "Ob ogranichenii oborota etilirovan-nogo benzina v Rossiiskoi Federatsii" [The decree of the State Duma of the Russian Federation No. 3302-III*

GD dated 15.11.2002 on the draft federal law No. 209067-3 "On limiting the turnover of leaded gasoline in the Russian Federation". *Zakony Rossii* [Laws of Russia]. URL: http://www.lawrussia.ru/texts/legal_149/doc149a777x242.htm (accessed: 13.02.2016).

Potakhin M. S. Morfologicheskie osobennosti vo-dnoemov g. Petrozavodsk [Morphological features of reservoirs in Petrozavodsk]. *Vodnaya sreda i prirodno-territorial'nye komplekсы: issledovanie, ispol'zovanie, okhrana: Mater. IV shkoly-konf. mol. uchenykh s mezhdunar. uchastiem* (Petrozavodsk, 26–28 avgusta 2011 g.) [Water Environment and Natural Territorial Complexes: Study, Use, and Protection: Proceed. of IV School-Conf. of Young Scientists with. Int. Part.]. Petrozavodsk, 2011. P. 180–183.

Promyshlennost' Petrozavodsk [The industry of Petrozavodsk]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Promyshlennost'_Petrozavodsk (accessed: 10.09.2017).

Raschet vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot liteinykh tsekhov: Metodicheskoe posobie po vypolneniyu prakticheskoi raboty po kursu "Promyshlennaya ekologiya" dlya studentov spetsial'nosti 320700 "Okhrana okruzhayushchei sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov" [Calculation of pollutant emissions from foundries: a methodological manual for practical work on the Industrial ecology course for the students of the specialty 320700 "Environmental protection and rational use of natural resources"]. Coll. by L. I. Bondaletova, V. T. Novikov, N. A. Alekseev. Tomsk: Izd. TPU, 2000. 34 p.

Rybakov D. S. Pervye dannye dendrogeokhimi-cheskogo opredeleniya mnogoletnei dinamiki zagryazneniya Petrozavodsk [First data on dendrogeochemical assessment of the long-term contamination dynamics in Petrozavodsk]. *Voprosy geologii i ekologii Karelii: Po mater. konf. molodykh uchenykh* [Problems of Geol. and Ecol. of Karelia: Proceed. of the Conf. of Young Scientists]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. P. 51–57.

Rybakov D. S., Krutskikh N. V., Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Slukovskii Z. I., Krichevtsova M. V., Lazareva O. V. Klimaticheskie i geokhimiicheskie aspekty formirovaniya ekologicheskikh riskov v Respublike Kareliya [Climatic and geochemical aspects of environmental risks formation in the Republic of Karelia]. St. Petersburg: ElekSis, 2013. 130 p.

Rybakov D. S., Veselkova S. A. Assotsiatsii khimicheskikh elementov v zagryaznennykh pochvogruntakh byvshei promyshlennoi ploschadki [Associations of chemical elements in contaminated soils of the former industrial site]. *Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problemy: Mater. 4-i nauch.-prakt. konf.* (Petrozavodsk, 30 sentyabrya – 2 oktyabrya 2015 g.) [Ecological Geology: Theory, Practice and Regional Problems: Proceed. of the 4th Scientific and Practical Conf. (Petrozavodsk, September 30 – October 2, 2015)]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2015. P. 191–194.

Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

Sin'kevich E. I., Ekman I. M. Donnye otlozheniya ozer Vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo kristallicheskogo shchita [Bottom sediments of the lakes of the Eastern part of the Fennoscandian Crystal Shield]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1995. 177 p.

Slukovskii Z. I. Normirovanie po litiyu kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Ladozhskoe i Chetyrekhverstnoe (Respublika Kareliya) [Normalization of lithium concentrations of heavy metals in the bottom sediments of Lakes Ladoga and Chetyrekhverstnoe (Republic of Karelia)]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Slukovskii Z. I. Ekologo-geokhimiicheskie analiz sostoyaniya donnykh otlozhenii malykh rek urbanizirovannykh territorii (na primere g. Petrozavodsk) [Ecological and geochemical analysis of bottom sediments of small rivers of urbanized territories (the case of the city of Petrozavodsk)]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk, 2014. 24 p.

Slukovskii Z. I., Medvedev A. S. Soderzhanie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v donnykh otlozheniyakh ozer Chetyrekhverstnogo i Lamba (g. Petrozavodsk, Respublika Kareliya) [The content of heavy metals and arsenic into the bottom sediments of Lakes Chetyrekhverstnoe and Lamba (Petrozavodsk, Karelia)]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological Chemistry]. 2015. No. 1. P. 56–62.

Slukovskii Z. I., Svetov S. A. Geokhimiicheskie indikatory tekhnogennoho zagryazneniya donnykh otlozhenii malykh rek v urbanizirovannoi srede [Geochemical indicators of technogenic pollution of bottom sediments in small rivers in an urbanized environment]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2016. No. 1. P. 38–45.

Subetto D. A. Donnye otlozheniya ozer: Paleolimnologicheskie rekonstruktsii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstructions]. Nauch. monogr. [Scientific Monograph]. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 339 p.

Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie [Water bodies of the city of Petrozavodsk: a tutorial]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Regerand. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 109 p.

Yanin E. P. Osobennosti granulometricheskogo sostava ruslovykh otlozhenii maloi reki v zone vliyaniya promyshlennogo goroda [Features of granulometric composition of channel sediments of a small river exposed to the impact of an industrial city]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceed. of Higher Ed. Institutions. Geol. and Exploration]. 2009. No. 3. P. 69–74.

Yanin E. P. Tekhnogennyye rechnye ily (veshchestvennyi sostav, geokhimiicheskie osobennosti, ekologicheskaya otsenka) [Technogenic river muds (material composition, geochemical features, ecological assessment)]. *Ekologicheskaya ekspertiza* [Environmental Expertise]. 2013. No. 1. P. 2–195.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *The*

Science of the Total Environment. 1992. Vol. 113, no. 3. P. 251–268. doi: 10.1016/0048–9697 (92) 90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrastný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environment International*. 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j. envint. 2007.10.005

Loring D. H. Lithium – a new approach for the granu-
lometric normalization of trace metal data. *Marine Chem-
istry*. 1990. Vol. 29. P. 155–168. doi: 10.1016/0304–
4203 (90) 90011-Z

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves
toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings
of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 34.
P. 12140–12144.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. The history
of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North
America: Evidence from lake and peat bog sediments.

Sources, Deposition and Capony Interactions. Vol. III,
Acidic Precipitation. N. Y.: Springer-Verlag. 1990. P. 73–
101. doi: 10.1007/978-1-4612-4454-7_4

Nriagu J. O. The rise and fall of leaded gasoline. *Sci-
ence of The Total Environment*. 1990. Vol. 92. P. 13–28.
doi: 10.1016/0048–9697 (90) 90318-O

Thomas V. M. The elimination of lead in gasoline.
Annual Review of Energy and the Environment. 1995.
Vol. 20. P. 301–324.

Teng Y., Ni S., Zhang C., Wang J., Lin X., Huang Y.
Environmental geochemistry and ecological risk of va-
nadium pollution in Panzhuhua mining and smelting
area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*.
2006. Vol. 25, no. 4. P. 379–385.

Received April 05, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слуковский Захар Иванович

старший научный сотрудник лаб. геохимии,
четвертичной геологии и геоэкологии
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: slukovskii_z@igkrc.ru

Ильмаст Николай Викторович

заведующий лаб. экологии рыб
и водных беспозвоночных
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика
Карелия, Россия, 185910
эл. почта: ilmast@karelia.ru

Суховская Ирина Викторовна

научный сотрудник лаб. экологической биохимии
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика
Карелия, Россия, 185910
эл. почта: sukhovskaya@inbox.ru

Борвинская Екатерина Витальевна

научный сотрудник лаб. экологической биохимии
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика
Карелия, Россия, 185910
эл. почта: katsu@inbox.ru

Гоголев Максим Александрович

младший научный сотрудник лаб. геохимии,
четвертичной геологии и геоэкологии
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: mag-333@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Slukovskii, Zakhar

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: slukovskii_z@igkrc.ru

Ilmast, Nikolay

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: ilmast@karelia.ru

Sukhovskaya, Irina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: sukhovskaya@inbox.ru

Borvinskaya, Ekaterina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: katsu@inbox.ru

Gogolev, Maksim

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mag-333@mail.ru

УДК 556.555.6:556.114.7:547 (282.247.211)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ И КАЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЕГО ТРАНСФОРМАЦИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Н. А. Белкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Рассчитан элементный состав органического вещества донных отложений и проанализированы его изменения по мере захоронения. Показана зональность процессов разложения органического вещества в донных отложениях по вертикали осадка. Предложен метод расчета количественных характеристик деструкции на основе профиля $C_{\text{орг}}$

Ключевые слова: донные отложения; деструкция органического вещества; элементный состав.

N. A. Belkina. QUANTITATIVE AND QUALITATIVE COMPOSITION OF ORGANIC MATTER AND ITS TRANSFORMATION IN A SURFACE LAYER OF LAKE ONEGO SEDIMENTS

The elemental composition of the organic matter of bottom sediments was calculated in the paper. Changes of quantitative and qualitative composition of organic matter in the course of its burial into sediments were analyzed. The paper shows zoning processes of organic matter decomposition in a sedimentary column. The rate of organic matter degradation was calculated on the basis of the profile of TOC.

Keywords: bottom sediments; degradation of organic matter; elemental composition.

Введение

Климатические условия и большой объем водной массы Онежского озера, второго по величине водоема Европы, определяют невысокие скорости осадконакопления и преимущественно минеральный состав взвешенного вещества, оседающего на дно. Присутствие кислорода в придонных водах в течение всего года обеспечивает в поверхностном слое донных отложений (ДО) окислительные условия минерализации органических веществ (ОВ),

содержание которых в среднем не превышает 20 % от сухой массы осадка [Семенович, 1973; Белкина, 2011, 2014; Озера..., 2013].

Поступающие в донные отложения ОВ имеют разный генезис и разную степень трансформации. Процессы разложения ОВ продолжаются в ДО и протекают с участием организмов зообентоса, живущих в поверхностном слое, а также микроорганизмов, обитающих по всей вертикали осадочных накоплений. Распределение количественных и качественных характеристик ОВ по колонке ДО определяется

распределением бентических сообществ, участвующих в процессе деструкции ОВ [Hakanson, Jansson, 1983]. Процесс гумификации происходит по принципу естественного отбора: остаются самые устойчивые к биоразложению структуры [Орлов, 1974, 1990; Перминова, 2000]. Результатом окисления природных органических соединений на любой стадии является стохастическая смесь молекул полимеров, в которой ни одно из соединений не тождественно другому. Такие свойства гумуса, как нестихиометричность состава, нерегулярность строения, гетерогенность структурных элементов и полидисперсность, обусловили развитие иных методов и подходов к описанию ОВ, чем это принято в органической химии. Одной из важных характеристик природного ОВ является элементный состав (С, N, H, O), описание вариаций которого позволяет судить о качественном составе, выявить происхождение и степень его преобразованности [Скопинцев, 1979; Скопинцев, Гончарова, 1987].

Целью представленной работы является исследование количественного и качественного состава ОВ ДО и оценка скорости разложения ОВ на основе его концентрационного распределения в поверхностном слое ДО на примере Петрозаводской губы Онежского озера.

Методы

Объектом исследования являются донные отложения Петрозаводской губы Онежского озера, площадь водной поверхности которой ~ 125 км², что составляет 1,3 % площади водоема. Длина ее 19 км, средняя ширина 7 км, средняя глубина 18,2 м. Контуров берегов сравнительно плавные, рельеф дна характеризуется слабой расчлененностью. Залив характеризуется высокой проточностью, его воды формируются за счет смешения озерных (ультрапресные воды, обогащенные O₂), речных (окрашенные гумусные воды низкого качества) и сточных вод Петрозаводского промцентра. Седиментационный режим губы зависит от водности года и гидрометеорологических условий, определяющих степень водообмена губы с озером, и интенсивности антропогенного воздействия [Литинская, 1965].

В марте 2015 г. в заливе (61°48'754" с. ш. 34°25'760" в. д.) с глубины 28 м пробоотборником Limnos был отобран поверхностный слой осадка мощностью 30 см. Колонка донных отложений делилась послойно, пробы паковались в пластиковые пакеты. На аналитической базе ИВПС КарНЦ РАН в осадках естественной влажности были определены рН (стеклянный

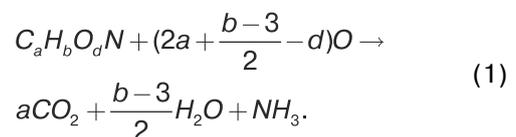
электрод) и Eh (потенциометрический метод, Pt-электрод с добавкой медиатора Трилон-Б). В воздушно-сухих осадках (после сушки при комнатной температуре) определялось химическое потребление кислорода (ХПК) (окисление грунта с K₂Cr₂O₇ в растворе H₂SO₄), потери при прокаливании (ППП) (гравиметрический метод, T = 105, 550 °C), азот органический (N_{орг}) (титриметрический метод после окисления донных отложений в H₂SO₄ по Кьельдалю) [Белкина, 2007; Озера..., 2013]. На аналитической базе Швейцарского федерального института водных наук и технологий (EAWAG) было проведено радиоизотопное датирование колонки (²¹⁰Pb) и определено общее содержание углерода (элементный анализатор EURO EA 3000) и неорганический углерод (UIC Inc. CM5015). По разнице общего и неорганического углерода был вычислен углерод органический (C_{орг}).

Расчет элементного состава органического вещества

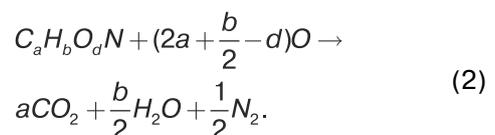
Для расчета элементного состава органического вещества донных отложений использовался методологический подход, основанный на решении системы уравнений окисления органического вещества в различных условиях, предложенный для описания природных вод Э. С. Бикбулатовым и получивший свое развитие в работах П. А. Лозовика [цит. по: Лозовик, 2006; Бикбулатов, 2009].

Предположим, что органическое вещество донных отложений состоит из четырех элементов с общей брутто-формулой C_aH_bO_dN. Запишем уравнения процессов окисления органического вещества в жестких условиях, протекающих в ходе анализа при определении ХПК и ППП.

Процесс окисления органического вещества бихроматом калия в сернокислой среде с применением в качестве катализатора сульфата серебра запишется следующим образом:



Процесс окисления органического вещества в мuffleной печи:

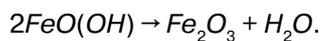


Для удобства вычислений будем рассматривать содержание органического вещества

в 100 г воздушно-сухого осадка. Обозначим содержание элементов органического вещества в донных отложениях как С, Н, N, O и запишем выражение для расчета индекса углерода в брутто-формуле:

$$\alpha = \frac{14}{12} \cdot \frac{C}{N}. \quad (3)$$

Из уравнения химической реакции (2) следует, что $ППП = ППП_{550^\circ} - ППП_{105^\circ}$ численно равны массе органического вещества в осадке. Необходимо отметить, что донные отложения Онежского озера содержат высокие концентрации железа (среднее содержание 4,4 %). При прокаливании осадка при 105 °С происходит лишь частичная дегидратация гидроксо-соединений железа. Образующаяся при этом железистая кислота при температуре 550 °С будет разлагаться далее с образованием оксида железа (III) и воды:



Поэтому в работе при оценке общего содержания органического вещества в донных отложениях была введена поправка на железо:

$$ППП = ППП_{550^\circ} - ППП_{105^\circ} - \frac{9}{56} Fe. \quad (4)$$

Запишем равенство $ППП = H + C + N + O$, которое содержит два неизвестных нам члена – содержание водорода и кислорода. Выразим содержание водорода и значение индекса водорода в брутто-формуле через другие составляющие органического вещества:

$$\begin{aligned} H &= ППП - C - N - O, \\ b &= \frac{ППП - C - N - O}{N}. \end{aligned} \quad (5)$$

По показателю ХПК можно определить стехиометрический коэффициент, стоящий в уравнении (1) при кислороде, и выразить, используя выражения (3) и (4), содержание кислорода в донных отложениях и индекс кислорода в брутто-формуле:

$$2a + \frac{b-3}{2} - d = \frac{14}{16} \cdot \frac{ХПК}{N},$$

$$O = \frac{8}{9} ППП - \frac{1}{9} ХПК - \frac{16}{27} C - \frac{68}{63} N, \quad (6)$$

$$d = \frac{7}{9} \cdot \frac{ППП}{N} - \frac{7}{72} \cdot \frac{ХПК}{N} - \frac{14}{27} \cdot \frac{C}{N} - \frac{34}{36}. \quad (7)$$

Важной характеристикой природного органического вещества является степень его окисленности (СО), которую принято выражать в процентах по отношению к степени окисленности глюкозы (условно принятой за 0; –100 %

соответствует метану, +100 % – углекислому газу) или в единицах электрохимической валентности (ЭВ) углерода (± 4), а также функционально связанная с СО степень восстановленности (СВ). Расчет средней ЭВ, СО и СВ органического вещества проводился по данным элементного состава:

$$ЭВ = \frac{2d + 3 - b}{a}, \quad (8)$$

где a, d, b – индексы в формуле $C_a H_b O_d N$,

$$CO = 25 \cdot ЭВ, \quad (9)$$

$$CO = 100 - 2 \cdot СВ. \quad (10)$$

Результаты химических анализов и расчетов характеристик ОВ и его элементного состава ДО Петрозаводской губы по уравнениям (3)–(10) представлены в таблице 1.

Обсуждение

Поверхностный слой ДО является биогеохимической барьерной зоной, контролирующей потоки вещества и энергии на границе водной экосистемы с литосферой. Ведущими процессами в этой зоне являются процессы трансформации ОВ. Минерализация ОВ в ДО Онежского озера имеет свои особенности, а именно наличие в поверхностном слое осадка кислородного барьера, т. е. переходной зоны, где окислительные условия меняются на восстановительные. Для изученных ДО Петрозаводской губы измерение окислительно-восстановительного потенциала показало, что изменение Eh по глубине колонки не монотонно (рис. 1). Профиль Eh можно разделить на 4 зоны: поверхность (0–0,3 см), где происходит увеличение значений Eh от 400 до 630 мВ (зона I); слой 0,3–5 см, где значение медленно возрастает с 630 до 720 мВ (зона II); редокс-барьер (5–9 см), где происходит резкое падение потенциала на 600 мВ (зона III); ниже расположена зона восстановленного осадка (IV), где значения Eh почти не изменяются (медиана 159 мВ), поскольку окислительно-восстановительные процессы уже не играют ведущей роли в диагенетических преобразованиях осадочного вещества, а ОВ, выступающее в качестве восстановителя в процессах раннего диагенеза, пройдя ряд преобразований, захоранивается в ДО в трудноокисляемой гуматной форме. По данным радиоизотопного датирования, время накопления поверхностного слоя барьерной зоны (~10 см) соответствует 50 годам, а время накопления всего изученного керна (30 см) – 400–500 лет, что указывает на значительные

Таблица 1. Химический состав донных отложений, элементный состав органического вещества, атомные отношения H:C, O:C, C:N и средняя валентность углерода (ЭВ)

Слой см	ППП	C _{орг} г/100 г ДО	N _{орг}	ХПК	C _г H _б O _д N			C	O	H	N	ЭВ	H:C	O:C	C:N	Формула
					a	d	b									
										% от ОВ						
0-0,3	15,41	5,59	0,450	12,29	14,5	16,6	26,0	36	55	5	3	-0,70	1,79	1,14	14,49	C _{14,5} (H ₂ O) _{11,5} O _{5,1} NH ₃
0,3-1	16,03	5,20	0,392	12,16	15,5	21,0	37,3	32	59	7	2	-0,49	2,41	1,35	15,48	C _{15,5} (H ₂ O) _{17,2} O _{3,8} NH ₃
1-2	17,24	5,10	0,336	11,23	17,7	27,8	46,3	30	62	6	2	-0,70	2,62	1,57	17,71	C _{17,7} (H ₂ O) _{21,7} O _{6,2} NH ₃
2-3	15,18	5,00	0,325	11,23	17,9	24,0	39,8	33	59	6	2	-0,63	2,21	1,34	17,95	C _{17,9} (H ₂ O) _{18,4} O _{5,7} NH ₃
3-4	15,18	4,90	0,250	10,91	22,9	31,9	51,6	32	60	6	2	-0,66	2,26	1,39	22,87	C _{22,9} (H ₂ O) _{24,3} O _{7,6} NH ₃
4-5	15,05	4,80	0,250	10,91	22,4	31,7	53,1	32	60	6	2	-0,59	2,37	1,41	22,40	C _{22,4} (H ₂ O) ₂₆ O _{6,6} NH ₃
5-6	15,05	4,00	0,320	11,23	14,6	25,8	57,6	27	63	9	2	0,21	3,95	1,77	14,58	C _{14,6} (H ₂ O) _{7,8} H _{1,5} NH ₃
6-7	12,90	3,20	0,300	10,00	12,4	23,7	59,0	25	63	10	2	0,69	4,74	1,91	12,44	C _{12,4} (H ₂ O) _{23,7} H _{4,3} NH ₃
7-8	10,44	2,60	0,280	9,07	10,8	20,1	56,5	25	62	11	3	1,23	5,22	1,85	10,83	C _{10,8} (H ₂ O) _{20,1} H _{6,7} NH ₃
8-9	7,28	1,50	0,476	7,55	3,7	7,8	31,6	21	58	15	7	3,55	8,60	2,12	3,68	C _{3,7} (H ₂ O) _{7,8} H _{6,5} NH ₃
9-10	10,92	2,00	0,308	10,29	7,6	20,0	71,2	18	65	14	3	3,72	9,40	2,64	7,58	C _{7,6} (H ₂ O) ₂₀ H _{14,1} NH ₃
10-11	10,24	2,80	0,364	7,55	9,0	14,9	33,2	27	61	8	4	0,04	3,70	1,66	8,97	C ₉ (H ₂ O) _{14,9} H _{0,2} NH ₃
11-12	10,62	3,00	0,420	7,55	8,3	13,3	27,7	28	60	8	4	-0,23	3,32	1,59	8,33	C _{8,3} (H ₂ O) _{12,3} O _{0,9} NH ₃
12-13	10,18	2,80	0,300	7,55	10,9	18,2	39,8	27	61	8	3	0,04	3,66	1,67	10,89	C _{10,9} (H ₂ O) _{18,2} O _{0,2} NH ₃
13-14	10,11	2,80	0,294	7,55	11,1	18,4	40,2	28	61	8	3	0,04	3,62	1,65	11,11	C _{11,1} (H ₂ O) _{18,4} O _{0,2} NH ₃
14-15	10,00	2,70	0,250	7,23	12,6	21,8	46,7	27	62	8	2	0,01	3,71	1,73	12,60	C _{12,6} (H ₂ O) _{21,8} O _{0,1} NH ₃
15-16	10,68	2,70	0,280	7,23	11,3	21,2	45,6	25	64	9	3	0,01	4,05	1,88	11,25	C _{11,3} (H ₂ O) _{21,2} O _{0,1} NH ₃
16-17	10,47	2,50	0,184	6,61	15,9	32,8	68,0	24	66	9	2	-0,03	4,29	2,07	15,85	C _{15,9} (H ₂ O) _{32,8} O _{0,3} NH ₃
17-18	10,42	2,50	0,196	6,61	14,9	30,5	63,5	24	66	9	2	-0,03	4,27	2,05	14,88	C _{14,9} (H ₂ O) _{30,5} O _{0,2} NH ₃
18-19	9,74	2,30	0,280	6,61	9,6	19,6	45,1	24	64	9	3	0,31	4,71	2,04	9,58	C _{9,6} (H ₂ O) _{19,6} H _{1,5} NH ₃
19-20	10,02	2,20	0,336	6,61	7,6	16,9	40,8	22	65	10	3	0,51	5,34	2,22	7,64	C _{7,6} (H ₂ O) _{16,9} H _{1,9} NH ₃
20-21	9,19	2,20	0,336	6,29	7,6	15,1	35,4	24	63	9	4	0,29	4,64	1,98	7,64	C _{7,6} (H ₂ O) _{15,1} H _{1,1} NH ₃
21-22	9,74	2,10	0,196	5,68	12,5	29,4	62,4	22	67	9	2	0,06	4,99	2,35	12,50	C _{12,5} (H ₂ O) _{29,4} O _{0,4} NH ₃
22-23	9,04	2,00	0,252	5,39	9,3	20,8	44,9	22	66	9	3	0,04	4,85	2,24	9,26	C _{9,3} (H ₂ O) _{20,8} O _{0,2} NH ₃
23-24	8,22	2,00	0,336	5,07	6,9	13,5	28,7	24	63	8	4	-0,20	4,13	1,95	6,94	C _{6,9} (H ₂ O) _{12,8} O _{0,7} NH ₃
24-25	8,99	2,00	0,280	5,07	8,3	18,6	38,5	22	66	9	3	-0,20	4,61	2,23	8,33	C _{8,3} (H ₂ O) _{17,7} O _{0,8} NH ₃
25-26	8,96	2,10	0,140	6,29	17,5	36,7	85,0	23	65	9	2	0,50	4,86	2,09	17,50	C _{17,5} (H ₂ O) _{36,7} H _{4,3} NH ₃
26-29	9,21	2,20	0,196	5,68	13,1	27,0	55,3	24	66	8	2	-0,13	4,22	2,06	13,10	C _{13,1} (H ₂ O) _{26,1} O _{0,8} NH ₃

изменения седиментационной обстановки в заливе в последние полвека.

Концентрация органического вещества в исследованной колонке донных отложений составляет в среднем около 12 %, среднее содержание органического углерода 3 % (табл. 1). Содержание биогенных элементов невелико (0,1–0,5 % N и 0,1–0,3 % P). Вертикальный профиль азота отличается неравномерным распределением, что, возможно, указывает на разные качественные характеристики органического вещества, поступающего из разных источников в донные отложения (речные воды, сточные воды, автохтонное органическое вещество, наземная растительность).

Зональность процессов окисления ОВ (выделенная по профилю Eh, рис. 1) закономерно прослеживается на распределении органического углерода по колонке ДО (рис. 2). Вертикальное распределение $C_{орг}$ делится на зоны, которые соответствуют определенным

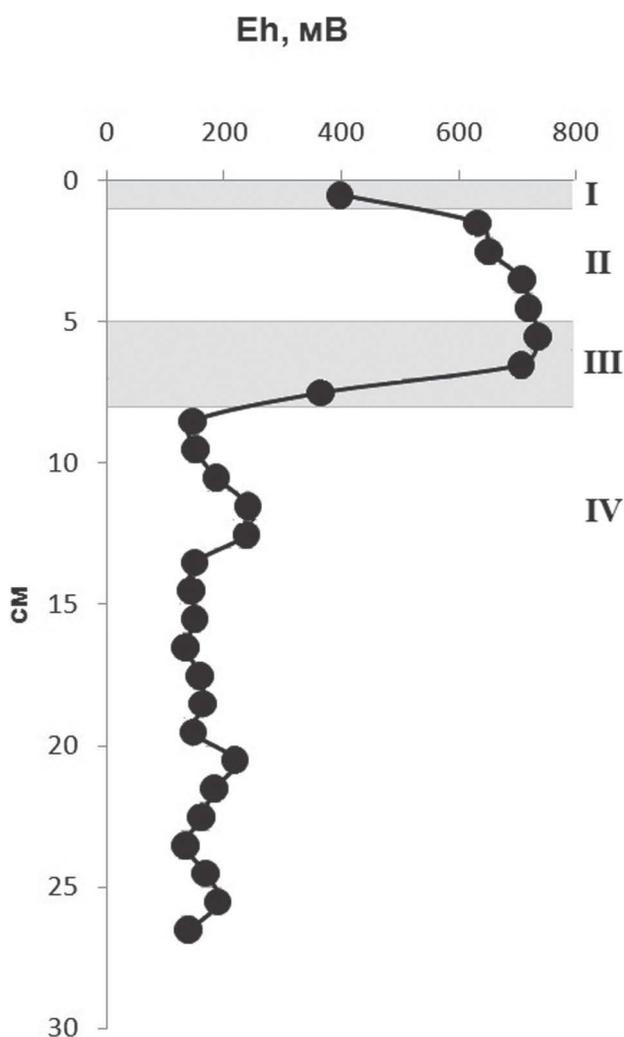


Рис. 1. Распределение Eh в ДО Петрозаводской губы Онежского озера (I–IV зоны изменения Eh)

диагенетическим процессам преобразования ОВ по мере его захоронения, причем каждый сегмент профиля характеризуется отличным от других градиентом концентрации $C_{орг}$. Распределения Eh, pH и $C_{орг}$ по глубине ДО отражают распределение бентических сообществ, потребляющих ОВ ДО в процессе своей жизнедеятельности, причем скорости потребления ОВ у различных групп организмов, пространственно разделенных по вертикали колонки, разные. Средние значения скорости деструкции ОВ для каждой зоны можно оценить по углу наклона линии тренда к сегменту концентрационного профиля углерода, находящегося в этой зоне (рис. 2; табл. 2). Концентрационные градиенты углерода на поверхности ДО (слой 0–0,3 см, изменение Eh 200 мВ, pH = 6,2) и в зоне редокс-барьера (слой 5–9 см, изменение Eh от 530 до –50 мВ, pH снижается до 5,6) сравнимы между собой и являются максимальными. Именно в этих слоях, где, по данным К. Томаса с соавт. [Thomas et al., 2016], зафиксированы максимумы бактериальной активности, процесс минерализации ОВ происходит наиболее интенсивно по сравнению с зоной II, расположенной в слое ДО на глубине от 0,3 до 5 см и которую можно назвать зоной активной миграции организмов зообентоса. Градиент концентрации $C_{орг}$ в восстановленной части

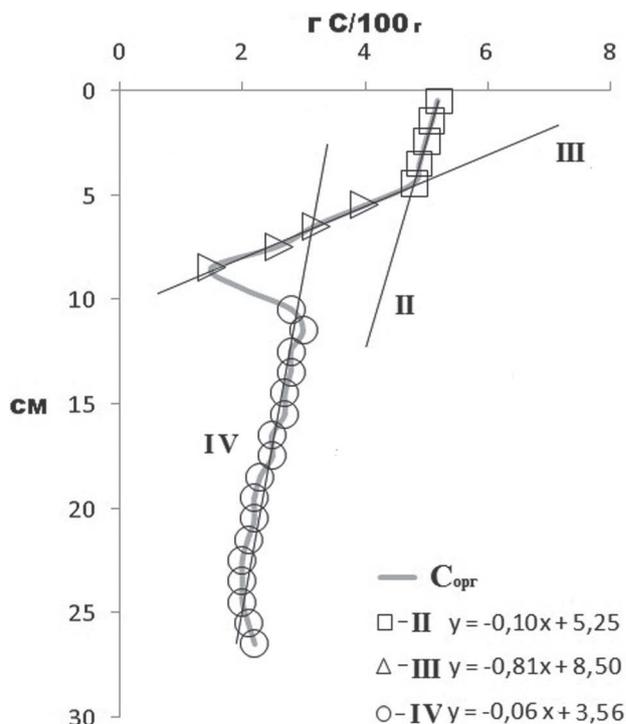


Рис. 2. Распределение $C_{орг}$ в ДО Петрозаводской губы Онежского озера (II–IV уравнения линий трендов к сегментам профиля, соответствующие зонам изменения Eh)

Таблица 2. Деструкция ОВ в ДО Петрозаводской губы

Зона	Слой см	Градиент		$V_{\text{седиментации}}^*$ мм×год ⁻¹	$V_{\text{деструкции}}$ мгС×м ⁻² см ⁻¹	Деструкция мгС×м ⁻² сутки ⁻¹
		%×см ⁻¹	мгС×см ⁻¹			
I**	0–0,3	1,30	1,29	0,20	7,04	2
II	0,3–5	0,10	0,15	0,15	0,61	3
III	5–9	0,81	1,60	0,10	4,39	18
IV	9–24	0,06	0,21	0,05	0,30	5
ДО	0–24					28

Примечание. *Скорость седиментации определена по ²¹⁰Pb, **градиент на границе ДО рассчитан по разнице содержания в поверхностном «наилке» (0–0,3 см) и в слое 0–1 см.

колонки (ниже 9 см) минимальный, рН медленно увеличивается до 6,5, Eh = 150 мВ.

Оценка скоростей разложения ОВ для данной колонки ДО (табл. 2) показала максимальную скорость на границе вода-дно (зона I), но ввиду малой мощности этого слоя вклад зоны в общую деструкцию ОВ поверхностного слоя ДО (0–24 см) невелик. Основным процесс разложения ОВ в исследованных ДО протекает в зоне III на геохимическом барьере. Скорость деструкции ОВ в восстановленной зоне (IV) в 2 раза меньше скорости разложения в зоне

II и более чем на порядок ниже, чем скорость разложения ОВ в зонах I и III. Суммарное значение деструкции ОВ (28 мгС×м⁻²сутки⁻¹) в поверхностном слое ДО мощностью 24 см, рассчитанное предложенным выше способом, сравнимо с экспериментальными данными (18–27 мгС×м⁻²сутки⁻¹), полученными швейцарскими коллегами в лабораторных условиях при наблюдениях за газовым режимом надосадочной жидкости в трубках, содержащих 20-см слой ДО.

Стратификация процессов трансформации ОВ ДО по глубине залегания, выделенная по $S_{\text{орг}}$, проявляется и в его элементном составе. Результаты расчетов, представленные в таблице 1, показывают, что в настоящее время в ДО Петрозаводской губы Онежского озера поступает достаточно окисленное трансформированное ОВ с преобладанием фульвовых кислот (СО = –17,5 %, СВ = 59) (рис. 3). Необходимо отметить разный качественный состав ОВ, поступающего в ДО этого района Онежского озера. Так, проведенные ранее наблюдения за характером седиментационного материала в заливе показали, что содержание в нем $S_{\text{орг}}$ изменялось от 4,8 до 6,3 %, степень окисленности от –24 до –1 %, степень восстановленности – от 50 до 60 %. А это означает, что количественные характеристики процесса минерализации ОВ на поверхности ДО являются наиболее изменчивыми. Действительно, в работах, опубликованных ранее, были представлены профили $S_{\text{орг}}$, где градиенты концентраций и вклад в процесс разложения ОВ в пограничной зоне ДО намного превышали таковые в зоне геохимического барьера [Белкина, 2005, 2006, 2011, 2014].

Далее в слое 0,3–5 см (зона II) восстановительные свойства ОВ ДО медленно уменьшаются с глубиной. Основным процесс трансформации ОВ в слое обитания зообентоса направлен на минерализацию азотсодержащих соединений (С/Ν изменяется от 14 до 23), немного увеличивается доля кислорода, что закономерно, поскольку процесс разложения

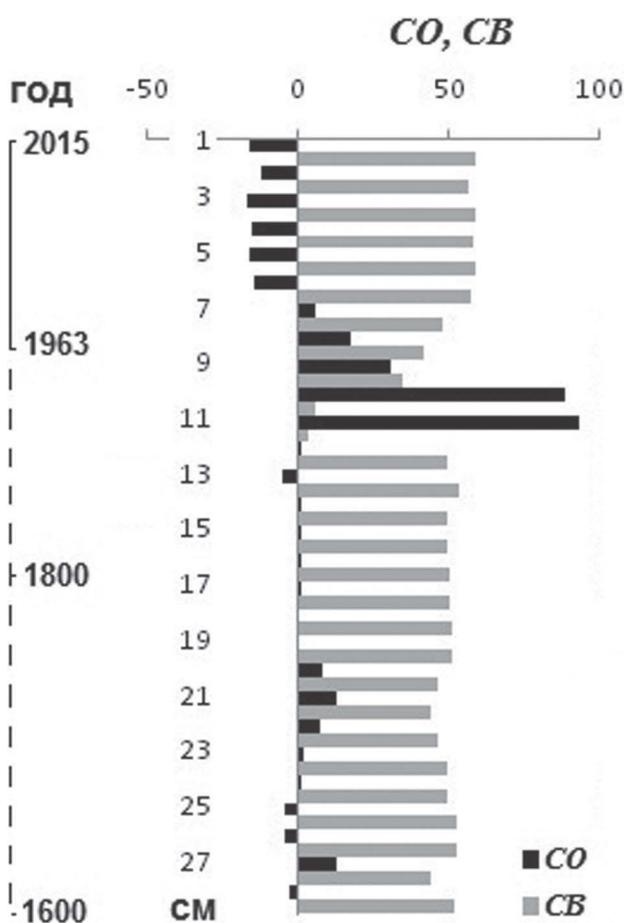


Рис. 3. Степень окисленности (СО) и степень восстановленности (СВ) ОВ поверхностного слоя ДО Петрозаводской губы Онежского озера

происходит в присутствии O_2 . Другие показатели ОВ меняются мало ($CO = -16\%$, $CB = 58\%$, $ЭВ = -0,6$). Фульватный характер гумуса резко изменяется на гуминовый в области редокс-барьера (зона III). Показатель C/N уменьшается (с 22 до 11), а H/C возрастает (с 2,4 до 5,2) в 2 раза. Электровалентность углерода и степень окисленности ОВ в этой зоне увеличиваются с глубиной ($ЭВ$ от 0,2 до 1,2, CO от -15 до 31%). Далее располагается слой с высоким содержанием песчаной фракции и минимальным содержанием органического вещества, степень окисленности которого максимальна (90%) и соответствует наиболее высокой электровалентности углерода (3,72). Ниже 10 см в восстановленной зоне ДО (зона IV) степень окисленности резко уменьшается до 0 и далее мало меняется с глубиной (среднее значение $CO = 1,5$, $CB = 49\%$, $ЭВ = 0,06$), что соответствует нерастворимым гуминовым веществам, выполняющим аккумулятивную функцию в биосфере, то есть наиболее устойчивым к разложению молекулам природных биополимеров, способных сохраняться длительное время.

В целом необходимо отметить, что элементный состав ОВ ДО Петрозаводской губы отличается более низким содержанием углерода по сравнению с данными о составе органического вещества природных вод и почв Карелии. Первые обнаруженные изменения качественного состава ОВ в зоне редокс-барьера по сравнению с выше- и нижележащими ДО требуют продолжения работ в этом направлении: более детального изучения качественного состава ОВ и исследований функционирования микробиологического сообщества ДО.

Выводы

1. Расчет элементного состава ОВ ДО, основанный на решении системы уравнений окисления ОВ в жестких условиях при определении ХПК и ППП, показал, что ОВ ДО Петрозаводской губы отличается более низким содержанием углерода по сравнению с природными водами и почвами Карелии. В ДО поступает окисленное ОВ с преобладанием фульвовых кислот. В поверхностном 5-см слое ДО процесс трансформации ОВ направлен на минерализацию азотсодержащих соединений. Далее, в зоне геохимического окислительно-восстановительного барьера, характер гумуса изменяется на гуминовый. Ниже барьерной зоны в ДО захораниваются устойчивые к разложению гуминовые вещества.
 2. Распределение Eh , pH и $C_{орг}$ по колонке ДО отражает зональность процессов де-
3. Оценка скорости деструкции ОВ в ДО Петрозаводской губы на основе концентрационного профиля $C_{орг}$ показала, что скорость разложения ОВ в поверхностном наилке ДО и в зоне редокс-барьера в 10 раз выше, чем в зоне обитания зообентоса, и в 30 раз выше, чем в восстановительной зоне ДО, ниже редокс-барьера. Суммарное значение деструкции ОВ оценено в $28 \text{ мгС} \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$, из которых 65% ОВ разлагается в зоне геохимического барьера.

Исследование выполнено в рамках мультидисциплинарного российско-швейцарского проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом. Взаимосвязанные подледные процессы под влиянием глобального потепления».

Литература

- Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 689–699.
- Белкина Н. А. Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 181–187.
- Белкина Н. А. Химический состав донных отложений Онежского озера // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Ред. П. А. Лозовик. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 40–49.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Водные проблемы Севера и пути их решения // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
- Белкина Н. А. Изменение окислительно-восстановительного состояния озерных донных отложений под влиянием антропогенных факторов (на примере Ладожского и Онежского озер) // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3. С. 152–158.
- Бикбулатов Э. С. Биоэлементы и их трансформация в водных экосистемах. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2009. 290 с.
- Литинская К. Д. Гидрология Петрозаводской губы Онежского озера как источника водоснабжения г. Петрозаводска // Вопр. гидрологии, озероведения и водного хозяйства. Вып. 23. Петрозаводск: Карел. книж. изд-во, 1965. С. 5–24.
- Лозовик П. А. Расчетно-аналитический метод оценки содержания и элементного состава органического вещества // Журнал аналитической химии. 2006. Т. 61, № 6. С. 592–597.
- Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. М.: МГУ, 1974. 333 с.

Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.

Перминова И. В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: Дис. ... докт. хим. наук. М.: МГУ, 2000. 359 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 104 с.

Скопинцев Б. А. Химические и биохимические показатели евтрофирования водоемов // Водные ресурсы. 1979. № 4. С. 34–37.

Скопинцев Б. А., Гончарова И. А. Современные проблемы региональной и прикладной гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 95 с.

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

Thomas C., Ariztegui D., Frossard V., Lyautey E., Perga M.-E., and Life Under Ice Scientific Team. Life under ice: Investigating microbial-related biogeochemical cycles in the seasonally-covered Great Lake Onego, Russia. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-17868.pdf> (дата обращения: 18.07.2016).

Поступила в редакцию 18.08.2016

References

Belkina N. A. Retrospektivnaya otsenka donnykh otlozhenii Kondopozhskoi guby Onezhskogo ozera [Retrospective assessment of the bottom sediments of the Kondopoga Bay of Lake Onega]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2005. Vol. 32, no. 6. P. 689–699.

Belkina N. A. Zagryaznenie nefteproduktami donnykh otlozhenii Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozera [Pollution of the bottom sediments with oil products in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 181–187.

Belkina N. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii Onezhskogo ozera [Chemical composition of the bottom sediments of Lake Onega]. Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. [State of the Water Bodies of the Republic of Karelia according to the Results of the Monitoring in 1998–2006]. Ed. P. Lozovik. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 40–49.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogenykh elementov v ozernykh ekosistemakh [The role of bottom sediments in the processes of transformation of organic matter and biogenic elements in lake ecosystems]. *Vodnye problemy Severa i puti ikh resheniya [Water Problems of the North and Ways of their Solution]*. *Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC of RAS]*. 2011. No. 4. P. 35–41.

Belkina N. A. Izmenenie okislitel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya ozernykh donnykh otlozhenii pod vliyaniem antropogennykh faktorov na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer [The change in the redox state of lake sediments under human impact (the cases of Lakes Ladoga and Onego)]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environment. Development]*. 2014. No. 3. P. 152–158.

Bikbulatov E. S. Bioelementy i ikh transformatsiya v vodnykh ekosistemakh [Bioelements and their transformation in aquatic ecosystems]. Rybinsk: Rybinskii dom pečati, 2009. 290 p.

Litinskaya K. D. Gidrologiya Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozera kak istochnika vodosnabzheniya g. Petrozavodsk [Hydrology of the Petrozavodsk Bay of Lake Onego as a source of water supply in Petrozavodsk]. *Vopr. gidrologii, ozerovedeniya i vodnogo*

khozyaistva [Issues of Hydrology, Limnology, and Water Management]. Petrozavodsk: Karel. knish. izd-vo, 1965. No. 23. P. 5–24.

Lozovik P. A. Raschetno-analiticheskii metod otsenki soderzhaniya i elementnogo sostava organicheskogo veshchestva [An analytical method for assessing the content and elemental composition of organic matter]. *Zhurnal analiticheskoi khimii [Journal of Analytical Chem.]*. 2006. Vol. 61, no. 6. P. 592–597.

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

Orlov D. S. Gumusovye kisloty pochv [Humic acids of soils]. Moscow: MSU, 1974. 333 p.

Orlov D. S. Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii [Humic acids of soils and the general theory of humification]. Moscow: MSU, 1990. 325 p.

Perminova I. V. Analiz, klassifikatsiya i prognoz svoystv gumusovykh kislot [Analysis, classification, and a forecast of humic acids properties]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow: MSU, 2000. 359 p.

Seменович Н. И. Донные отложения Онежского озера [The bottom sediments of Lake Onego]. Leningrad: Nauka, 1973. 104 p.

Skopintsev B. A. Khimicheskie i biokhimicheskie pokazateli evtrofirovaniya vodoemov [Chemical and biochemical indicators of water bodies eutrophication]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 1979. No. 4. С. 34–37.

Skopintsev B. A., Goncharova I. A. Sovremennye problemy regional'noi i prikladnoi gidrokhimii [Modern problems of regional and applied hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 95 p.

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

Thomas C., Ariztegui D., Frossard V., Lyautey E., Perga M.-E., and Life Under Ice Scientific Team. Life under ice: Investigating microbial-related biogeochemical cycles in the seasonally-covered Great Lake Onego, Russia. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-17868.pdf> (accessed: 18.07.2016).

Received August 18, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Белкина Наталья Александровна
старший научный сотрудник лаборатории
палеолимнологии, к. г. н., доцент
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bel110863@mail.ru
тел.: +78142576541

CONTRIBUTOR:

Belkina, Natalya
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bel110863@mail.ru
tel.: +78142576541

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.52

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В МАЛОПРОТОЧНОМ СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков, К. К. Эдельштейн

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Анализируются результаты моделирования изменений биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище за 55-летний период его эксплуатации в качестве источника водоснабжения г. Москвы. Приводятся основные расчетные уравнения фитопланктонного блока гидрологической модели водохранилища и их уточненные параметры. По результатам модельных расчетов многолетних колебаний интенсивности развития фитопланктона в вегетационный период проведен многоплановый корреляционный анализ факторов продуктивности водохранилища. Рассматривается комплекс абиотических факторов, которые разделены на группы по характеру влияния и формам проявления в экосистеме водоема – гидрологические, метеорологические, гидрохимические и факторы режима регулирования стока гидроузлом. Выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище. Статистическими расчетами линейных связей установлены наиболее значимые факторы межгодовых изменений продукционных процессов и развития фитопланктона. Показано, что в летний период развитие фитопланктона в водохранилище определяет паводочный сток, формирующий внешнюю биогенную нагрузку на водоем, в то время как характеристики погодных условий слабо скоррелированы с биомассой фитопланктона в вегетационный период. Диатомовые водоросли относятся к наименее предсказуемой группе фитопланктона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диатомовые водоросли; синезеленые водоросли; продукционные процессы; гидрометеорологические факторы; водохранилище; корреляционный анализ; моделирование.

Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON PHYTOPLANKTON GROWTH IN A LOW-FLOW STRATIFIED STORAGE RESERVOIR

The results of simulation of changes in the phytoplankton biomass in Mozhaiskoye reservoir during the 55-year period of its operation as a source of water supply for Moscow were analyzed. The principal design equations for the phytoplankton unit of the reser-

voir's hydrological model and their updated parameters are presented. The results of model calculations of multiannual fluctuations of the phytoplankton growth rate during the growing season were used for a multidimensional correlation analysis of the factors for the reservoir's productivity. We consider a set of abiotic factors grouped according to the type of impact and manifestations in the ecosystem of the reservoir into hydrological, meteorological, hydrochemical and factors related to flow regulation by hydropower engineering. A steady long-term upward trend was revealed in the phytoplankton growing-season biomass in Mozhaiskoye reservoir. Statistical calculations of linear relations detected the most important factors for among-year variations in production processes and phytoplankton growth in the reservoir. It was shown that the level of phytoplankton growth in the reservoir in summer is determined by peak flow, which generates the external nutrient loading on the reservoir, while meteorological factors show little correlation with phytoplankton biomass in the growing season. Diatoms are the least predictable group of phytoplankton.

Key words: diatoms; blue-green algae; production processes; hydro-meteorological factors; storage reservoir; correlation analysis; modeling.

Введение

Изучение процессов развития фитопланктона находится в центре большинства комплексных лимнологических исследований внутренних водоемов, так как фитопланктон относится к тем биотическим компонентам экосистемы водоема, которые определяют энергетическую основу круговорота вещества и энергии, оказывая большое влияние на качество воды и интенсивность трофических взаимодействий компонентов экосистемы. Практический интерес к исследованиям фитопланктона обусловлен тем, что его интенсивное развитие в летний период, называемое «цветением воды», приводит к заметному ухудшению качества воды в водоемах и создает проблемы при ее использовании в водоснабжении.

К сожалению, в настоящее время успехи лимнологов на пути познания закономерностей развития фитопланктона и его прогнозирования более чем скромные. Надежных методов прогноза этого явления не существует, несмотря на то что главные факторы развития планктона достаточно хорошо известны. Трудность состоит в том, что эти факторы действуют одновременно, хотя и с разной интенсивностью. Не имея надежных количественных оценок влияния отдельных факторов, невозможно получить результат их сложной комбинации и спрогнозировать явление.

Задача диагностической оценки условий развития цветения воды особенно актуальна для водохранилищ Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы, осуществляющих многолетнее регулирование стока. Эти водохранилища относятся к типу эвтрофных водоемов, поэтому обильное развитие фитопланктона в них в летний период явление обычное

[Левшина, 1980]. Колебания первичной продуктивности и особенности круговорота вещества и энергии в водохранилищах характеризуются исключительно большой нестационарностью, связанной с колебаниями гидрологического режима притока воды и внешнего воздействия в виде непредсказуемо меняющихся синоптических условий. При невозможности воспроизвести эти воздействия в природных условиях используются расчеты по математической модели различных сценариев, что позволяет выявить особенности отклика экосистемы на это воздействие.

Задача настоящего исследования – по результатам расчета суточных величин биомассы фитопланктона за все 55 лет эксплуатации самого емкого в Москворецкой водохозяйственной системе Можайского водохранилища [Комплексные исследования..., 1979]:

- выделить периоды ежегодного цветения водохранилища,
- определить тенденцию изменения его интенсивности,
- получить статистические оценки зависимости биомассы фитопланктона от режима регулирования речного стока Можайским гидроузлом и от природных гидрометеорологических и гидрохимических факторов.

Материалы и методы

Для изучения многолетних изменений биомасс фитопланктона в водохранилище использована математическая двумерная боксовая Гидроэкологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ. Расчетами по этой модели оцениваются среднесуточные значения физических, химических и биологических характеристик состава воды в отдельных плесах долинных

водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования речного стока при меняющихся погодных условиях и расходах воды притоков. Анализ применения модели ГМВ-МГУ для расчетов гидрологического режима различных водохранилищ Московского региона за отдельные годы показал вполне удовлетворительные результаты при условии тщательной подготовки (проверки на репрезентативность и достоверность) необходимых для расчетов исходных данных. Структура этой модели и верификация выполненных по ней гидроэкологических диагностических расчетов детально изложена в монографии [Гидроэкологический режим..., 2015].

Для верификации экологического блока модели при условии ее реализации с учетом всего разнообразия гидрометеорологических условий, наблюдавшихся за время существования Можайского водохранилища, был сформирован файл исходных данных с суточным разрешением за период с 1961 по 2015 г., который включает следующую информацию: расходы сброса воды в нижний бьеф гидроузла, уровень воды в водохранилище, метеоданные (осадки, скорость и направление ветра, упругость водяного пара, облачность общая и нижняя, солнечная радиация, атмосферное давление), расходы воды притоков и их физические и гидрохимические характеристики (температура и электропроводность воды, содержание растворенного кислорода, биогенные элементы (азот, фосфор, кремний, железо), мутность воды, содержание детрита, перманганатная и бихроматная окисляемость, сульфаты, pH). Информация о характеристиках гидрологического режима Можайского водохранилища и его притоков получена по данным о режиме работы Можайского гидроузла и гидрологическим ежегодникам государственного водного кадастра, метеоинформация – по данным Можайской метеостанции. Состав речных вод, поступающих в водохранилище, определяется соотношением генетических типов вод, формирующихся на водосборе. В основном это склоновые, почвенные и грунтовые воды. Их поступление в речную сеть определяется климатом территории, который формирует различные фазы речного стока и водного режима рек. Поэтому характеристики состава водных масс притоков задавались по их эмпирическим зависимостям от расходов воды, полученным по данным наблюдений Красновидавской лаборатории по изучению водохранилищ и материалам гидрологических ежегодников за 1956–2012 гг. для каждой из шести фаз водного стока: подъем весеннего половодья, спад половодья, летне-осенние дождевые

паводки, летне-осенняя межень, зимняя межень и зимние паводки.

Верификационные расчеты показали, что модель вполне адекватно отражает уровенный, термический, ледовый и гидрохимический режим Можайского водохранилища [Гидроэкологический режим..., 2015].

Базовое уравнение для расчета биомассы каждой группы фитопланктона имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B_a}{\Delta t} = & K_{ag} \cdot B_a - K_{ar} \cdot B_a - K_{ae} \cdot B_a - \\ & - K_{am} \cdot B_a + \omega_a \cdot \frac{\Delta B_a}{\Delta z} - K_z \cdot B_z \cdot \frac{\sigma_{az} \cdot B_a}{\Phi_z} - \\ & - K_f \cdot B_f \cdot \frac{\sigma_{af} \cdot B_a \cdot V}{\Phi_f} \end{aligned} \quad (1)$$

где представлены биомассы, г/м³: B_a – фитопланктона, B_z – зоопланктона, B_f – рыб; скорости процессов, 1/сут: K_{ag} – роста, K_{ar} – дыхания, K_{ae} – экскреции, K_{am} – отмирания фитопланктона; K_z – питания зоопланктона; K_f – питания рыб; ω_a – скорость осаждения фитопланктона, м/сут; коэффициенты предпочтения пищи по фитопланктону: σ_{az} – для зоопланктона, σ_{af} – для рыб; концентрации имеющейся общей весовой пищи в боксе с учетом предпочтений: Φ_z – для зоопланктона, г/м³, Φ_f – для рыб, г; V – объем бокса, м³.

Скорость роста фитопланктона лимитируется светом, температурой и концентрацией биогенных веществ:

$$K_{ag} = \gamma_{1a} \cdot \gamma_{2a} \cdot \lambda_{\min} \cdot K_{ag\max}, \quad (2)$$

где γ_{1a} – параметр, характеризующий подъем кривой температурного лимитирования; γ_{2a} – параметр, характеризующий спад температурной кривой; λ_{\min} – лимитирующий фактор (минимум из функций светового и биогенного питания); $K_{ag\max}$ – максимальная скорость роста, 1/сут.

Влияние температуры воды на биохимические процессы формализовано в модели в виде аналитического выражения, предложенного в работе [Thornton, Lessem, 1978]:

$$\gamma(T) = 0 \text{ при } T \leq T_1 \text{ и при } T \geq T_4; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma(T) = \gamma_1 \cdot \gamma_2 = & \frac{K_1 \exp[\lambda_1(T - T_1)]}{1 + K_1 \{\exp[\lambda_1(T - T_1)] - 1\}} \cdot \\ & \frac{K_4 \exp[\lambda_2(T_4 - T)]}{1 + K_4 \{\exp[\lambda_2(T_4 - T)] - 1\}} \text{ при } T_1 < T < T_4, \end{aligned} \quad (4)$$

где T_1 – минимальная и T_4 – максимальная температура, при которых биохимический процесс прекращается; $\lambda_1 = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{K_2(1 - K_1)}{K_1(1 - K_2)}$ – пара-

Таблица 1. Параметры блока расчета фитопланктона, принятые в модели

Параметры блока «фитопланктон»	диатомовые	прочие	синезеленые
Нижний температурный предел T_1 , °C	0,0	2,0	10,0
Нижний температурный оптимум, T_2 °C	8,0	12,0	15,0
Верхний температурный оптимум, T_3 °C	12,0	20,0	26,0
Верхний температурный предел T_4 , °C	22,0	30,0	35,0
Температурный множитель K_1 и K_4	0,1	0,1	0,1
Температурный множитель K_2 и K_3	0,98	0,98	0,98
Интенсивность света для макс. скорости роста I_s , Вт/м ²	47,80	33,26	20,15
Коэффициент полунасыщения P_b , мг/л по фосфору	0,001	0,001	0,001
по азоту	0,07	0,009	0,006
по CO ₂	0,8	0,1	0,1
по кремнию	0,5	–	–
Максимум скорости роста биомассы $K_{ag\ max}$, 1/сут	3,5	2,0	2,5
дыхания в темноте $K_{ar\ max}$, 1/сут	0,15	0,10	0,08
экскреции $K_{ae\ max}$, 1/сут	0,04	0,04	0,05
естественной смертности $K_{am\ max}$, 1/сут	0,09	0,06	0,07
осаждения ω_a , м/сут	0,45	0,10	0,05
Коэффициент предпочтения в питании зоопланктона σ_{az}	0,4	0,2	0,0
в питании рыб σ_{af}	0,3	0,0	0,0

метр, характеризующий подъем кривой температурного множителя; K_1 , K_2 – значения температурного множителя при лимитирующих значениях температур T_1 и T_2 ;
 $\lambda_2 = \frac{1}{T_4 - T_3} \ln \frac{K_3(1 - K_4)}{K_4(1 - K_3)}$ – параметр, характеризующий спад кривой температурного множителя; K_3 , K_4 – значения температурного множителя при лимитирующих значениях температур T_3 и T_4 ; T_2 – нижний и T_3 – верхний предел интервала оптимальных температур ($T_2 \div T_3$), при которых процесс протекает с максимальной скоростью.

Лимитирующая функция по световым условиям определяется по классической схеме (функция Стила), описанной, например, в монографии [Charpa, Reckhow, 1983]:

$$\lambda_l = \frac{I}{I_s} \cdot \exp\left(1 - \frac{I}{I_s}\right), \quad (5)$$

где λ_l – фактор лимитирования роста фитопланктона светом; I – приходящая в бок солнечная радиация, Вт/м²; I_s – оптимальная для развития водорослей солнечная радиация, Вт/м².

Лимитирование по биогенному питанию выполняется по функции Моно:

$$\lambda_n = \frac{C_b}{C_b + P_b}, \quad (6)$$

где C_b – концентрация биогенного элемента, мг/л; P_b – коэффициент полунасыщения функции Моно для биогенного элемента, мг/л.

Потери биомассы фитопланктона при дыхании (экскреции) и смертности оценивались произведением зависящих от температуры коэффициентов на параметры максимальных значений скорости этих процессов:

- на дыхание $K_{ar} = \gamma_{1a} \cdot K_{ar\ max}$,
где $K_{ar\ max}$ – максимальная скорость дыхания фитопланктона, 1/сут;
- на метаболические выделения (фотодыхание) $K_{ae} = (1 - \lambda_l) \cdot K_{ae\ max}$,
где $K_{ae\ max}$ – максимальная скорость выделения, 1/сут;
- на смертность $K_{am} = \gamma_{1a} \cdot \gamma_{2a} \cdot K_{am\ max}$,
где $K_{am\ max}$ – максимальная скорость отмирания фитопланктона, 1/сут.

На основании сопоставления результатов имитации развития фитопланктона и данных наблюдений были уточнены некоторые параметры фитопланктонного блока модели (табл. 1) и внесены изменения в алгоритм расчета, отражающий потери биомассы фитопланктона в результате его смертности:

$$K_{am} = (1 - \gamma_{1a}) \cdot K_{am\ max}. \quad (7)$$

Результаты и обсуждение

Валидация расчета режима биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище проводилась по обобщенным нами многолетним данным наблюдений Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ географического

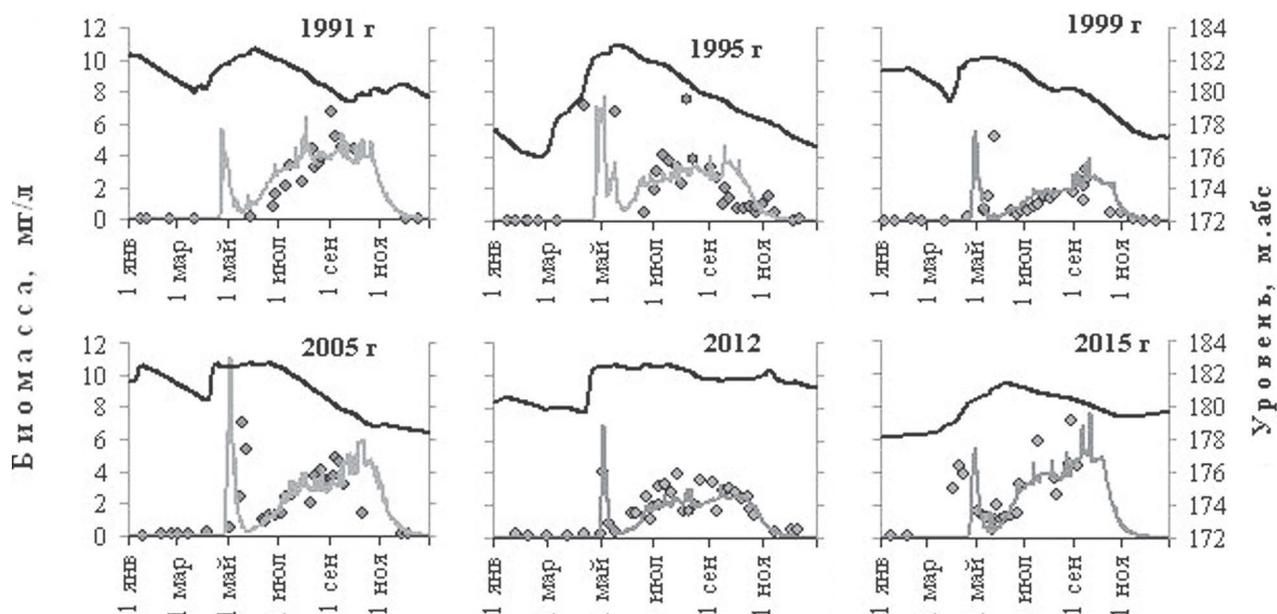


Рис. 1. Результаты расчета уровня воды (черная линия), биомассы фитопланктона (мг/л) (серая линия) и наблюдаемых величин биомассы фитопланктона (точки) в поверхностном слое Приплотинного плеса водохранилища

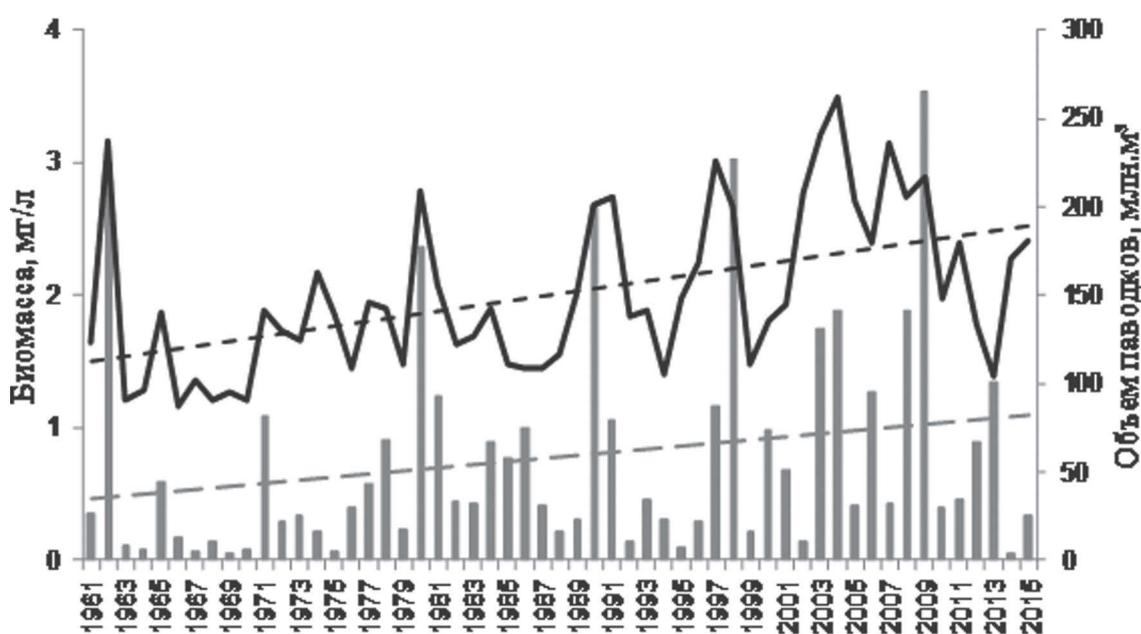


Рис. 2. Результаты расчета общей биомассы фитопланктона (линия) в поверхностном слое Приплотинного плеса Можайского водохранилища и объема притока летних паводков (гистограмма) за период 1961–2015 гг.

факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и данным режимных наблюдений лаборатории контроля качества воды Можайского гидроузла. Результаты выполненной за отдельные годы валидации опубликованы в работах [Гидроэкологический режим..., 2015; Пуклаков, Замана, 2015]. Расчет режима биомассы фитопланктона за 55-летний период существования водохранилища показал вполне адекватный результат для большинства расчетных лет (за исключением

нескольких вегетационных сезонов с массовым развитием пиррофитовых водорослей). Пример графической интерпретации результатов расчета биомассы фитопланктона в поверхностном слое Приплотинного плеса водохранилища за различные годы представлен на рисунке 1.

В многолетней изменчивости обилия фитопланктона в водохранилище выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона

в Можайском водохранилище на фоне климатического увеличения паводкового стока (рис. 2).

Проведенные расчеты позволяют статистическим анализом линейных связей выявить наиболее значимые факторы межгодовых изменений продукционных процессов и развития фитопланктона в водохранилище. В качестве характеристик режима фитопланктона рассматривались:

- среднее за вегетационный сезон (апрель–ноябрь) значение общей биомассы фитопланктона в водоеме в верхнем слое, мг/л;
- средняя и максимальная концентрации диатомовых и синезеленых водорослей в поверхностном слое верховьев, центрального и нижнего районов водохранилища за период цветения их вод (при среднесуточных значениях в поверхностном слое более 1 мг/л);
- дата начала цветения (количество суток от начала календарного года);
- продолжительность периода цветения воды, сут.

Комплекс абиотических факторов при рассмотрении их роли в формировании условий развития фитопланктона целесообразно разделить на группы по характеру влияния и формам проявления в экосистеме водоема:

Гидрологические факторы

- объем годового притока воды с водосбора, $W_{год}$, млн м³;
- приток воды за весеннее половодье, $W_{пол}$, млн м³;
- приток воды дождевых паводков вегетационного периода, $W_{пав}$, млн м³;
- коэффициент водообмена водохранилища за период весеннего половодья $K_{вн} = (W_{пол} + W_{ст}) / (2W_{ср})$;
- интенсивность весеннего заполнения водохранилища $K_{инт} = \Delta t_{пол} / t_{ср}$; t – число суток;
- средняя скорость продольного переноса водных масс водохранилища в периоды половодья и цветения водорослей $V = L * K_{вн} / t$, км/сут.

Метеорологические факторы

- количество атмосферных осадков за рассматриваемые периоды времени, мм;
- средняя скорость ветра за периоды цветения, м/с;
- количество штилевых дней (со средней скоростью ветра менее 1 м/с);
- среднее значение температуры воздуха, °С.

Гидрофизические факторы

- поступление в водоем солнечной радиации, Вт/м²;

- среднее значение температуры воды поверхностного слоя, °С.

Гидрохимические факторы

- внешняя (поступление с водосбора) биогенная нагрузка (азота и фосфора), мг/л;
- внутренняя (поступление из донных отложений) биогенная нагрузка, мг/л.

Факторы антропогенного регулирования стока

- соотношение объема зимних вод водохранилища с объемом вод половодья (коэффициент обновления водных масс $K_{обм} = W_{зим} / W_{пол}$);
 - коэффициент предвесенней сработки водохранилища $K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$;
 - коэффициент наполнения водохранилища в период цветения $K_{нап} = W_{ср} / W_{нпу}$.
- Здесь $W_{ст}$, $W_{ср}$ – объем стока и средний объем водохранилища за рассматриваемый период времени, млн м³; $W_{пол}$, $W_{зим}$, $W_{нпу}$ – объем половодья, объем зимних вод водохранилища и его объем при НПУ, млн м³; $\Delta t_{пол}$, $t_{ср}$ – длительность половодья данного года и средняя многолетняя (50 % обеспеченности) длительность половодья, сут; L – длина водохранилища при НПУ, км.

Результаты расчета коэффициентов корреляции всего комплекса факторов с характеристиками фитопланктона за многолетний период помещены в таблицах 2–5.

Можайское водохранилище расположено в верховьях р. Москвы (55°36' с. ш., 35°49' в. д.) и входит в систему водоснабжения московского мегаполиса [Комплексные исследования..., 1979; Гидроэкологический режим..., 2015]. Это относительно глубоководный морфологически простой водоем долинного типа (объем при НПУ 0,24 км³, площадь 31 км², максимальная глубина 22 м), многолетнего регулирования, имеющий вытянутую в плане акваторию и замедленный водообмен. В модели ГМВ-МГУ пространственная схематизация Можайского водохранилища представлена в виде 19 отсеков (рис. 3), выделенных по его отдельным плесам с учетом их морфометрических и гидродинамических особенностей по методике, предложенной Ю. М. Матарзиным [Матарзин, Мацкевич, 1970]. В данной работе цветение воды в каждом районе водохранилища характеризуется величиной средней биомассы фитопланктона, рассчитанной для наиболее крупных в них плесов: в верховом районе – обширный мелководный Бычковский плес с глубинами $h \leq 6$ м (расчетный отсек № 4), в центральном районе – Красновидовский

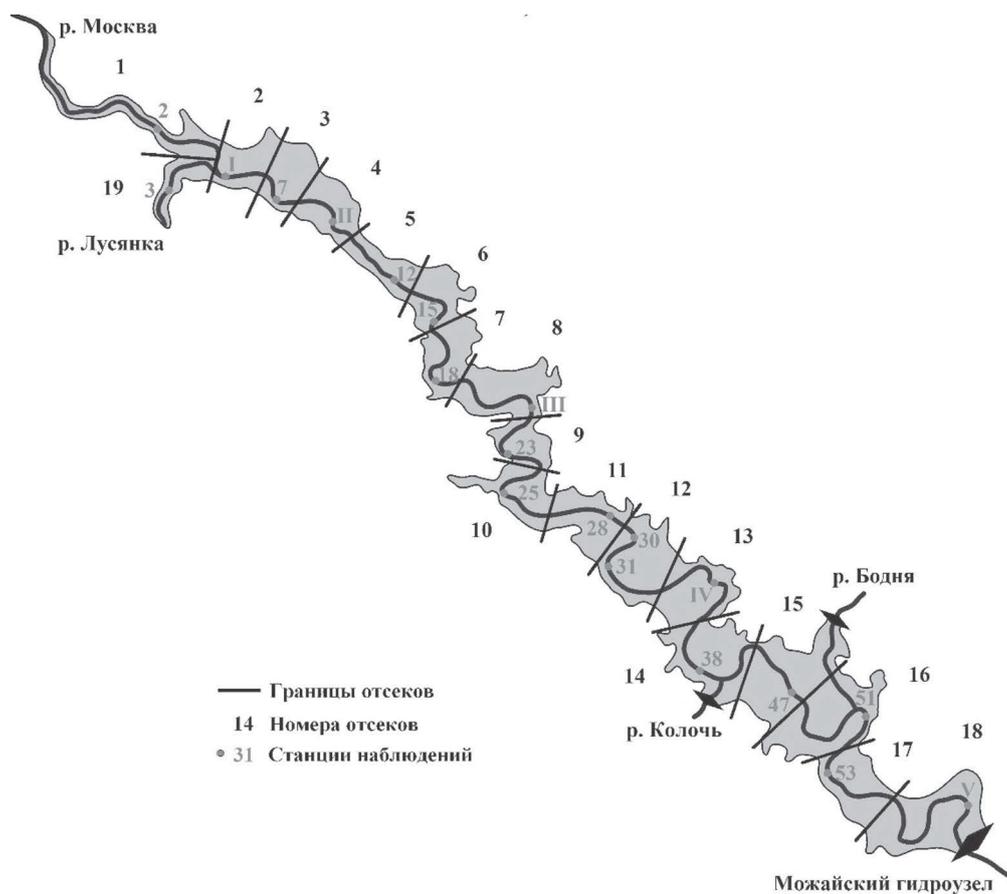


Рис. 3. Схема деления Можайского водохранилища на расчетные отсеки

плес с $h \leq 15$ м (отсек № 13) и в нижнем районе – самый глубоководный Приплотинный плес с $h \leq 22$ м (отсек № 18). При длине рядов расчетных значений $n = 55$ и при 1%-й доверительной вероятности коэффициенты корреляции статистически значимы при величине $R \geq 0,345$, при 5%-й вероятности они значимы при $R \geq 0,266$, а при $0,225 \leq R < 0,266$ статистически значимы лишь как тенденции [Урбах, 1964].

Исключительно высокое многообразие действующих факторов и сложная опосредованность их влияния на развитие растительных клеток фитопланктона обусловили относительно низкие значения большинства рассматриваемых парных линейных связей предикторов и характеристик фитопланктона. Фактически лишь колебание притока биогенных веществ в отдельные годы может в существенной степени контролировать уровень продукционных процессов. Ни один из других факторов-предикторов не может считаться доминирующим при оценке биомассы фитопланктона в водохранилище в отдельные годы. При такой сложной совокупности абиотических воздействий статистическим анализом можно выявить только относительную роль межгодовых колебаний

отдельных факторов в развитии фитопланктона в водохранилище.

Первичная продуктивность экосистемы Можайского водохранилища, оцениваемая по средневегетационной биомассе всего фитопланктона (табл. 2), наиболее тесно связана с притоком биогенных веществ в водохранилище и объемом дождевых паводков (коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,5–0,7). На уровне значимой положительной корреляционной связи она связана с температурой воды, осадками, приходящей солнечной радиацией, количеством штилевых дней, коэффициентом соотношения зимних вод и вод половодья, объемом годового стока и интенсивностью весеннего наполнения водохранилища. Отрицательные корреляционные связи для средних за вегетационный период значений биомассы фитопланктона получены со скоростью ветра, притоком биогенов и скоростью продольного перемещения воды по водохранилищу в половодье, с объемом половодья и коэффициентом предвесенней сработки водохранилища. На уровне значимой тенденции (доверительная вероятность $0,5 < p \leq 0,1$) получена связь средней биомассы фитопланктона с притоком биогенов из донных отложений.

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции средней биомассы всего фитопланктона (ФП), диатомовых и синезеленых водорослей с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Весь ФП	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Весь водоем	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,328	0,390	0,213	0,042	0,420	0,320	0,159
Половодье, млн м ³	-0,364	0,246	-0,098	-0,105	-0,235	-0,344	-0,449
Паводки, млн м ³	0,625	-0,102	-0,134	-0,208	0,621	0,642	0,505
Коэффициент водообмена	-0,185	0,342	-0,013	-0,007	-0,124	-0,197	-0,342
Интенсивность заполнения	0,295	0,263	0,326	0,327	0,016	0,190	0,222
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	-0,405	0,065	-0,317	-0,336	-0,126	-0,344	-0,497
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,216	0,508	0,199	0,036	0,559	0,633	0,498
Осадки, мм	0,437	0,089	0,069	-0,020	0,437	0,432	0,360
Ветер, м/с	-0,449	0,306	-0,115	-0,058	-0,421	-0,225	-0,233
Количество штилевых дней	0,375	-0,054	0,169	-0,033	0,631	0,350	0,315
Радиация, Вт/м ²	0,410	-0,207	-0,208	-0,096	0,055	0,142	0,184
Температура воздуха, °С	0,158	-0,029	-0,132	0,001	0,115	0,002	0,011
Температура воды, °С	0,439	-0,332	-0,177	0,025	0,140	0,028	0,099
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	-0,428	0,124	-0,140	-0,170	-0,226	-0,397	-0,525
Приток N за половодье, мг/м ² сут	-0,401	0,157	-0,177	-0,185	-0,219	-0,366	-0,510
Приток Р, мг/м ² сут	0,592	0,374	0,158	-0,028	0,822	0,891	0,878
Приток N, мг/м ² сут	0,613	0,363	0,164	-0,027	0,820	0,907	0,888
Регенерация Р, мг/м ² сут	0,216	-0,170	-0,015	-0,127	0,352	0,154	0,191
Регенерация N, мг/м ² сут	0,239	0,038	0,064	-0,118	0,366	0,153	0,169
$K_{\text{овм}} = W_{\text{зим}} / W_{\text{пол}}$	0,351	-0,036	0,153	0,064	0,167	0,317	0,431
$K_{\text{срб}} = (W_{\text{нпу}} - W_{\text{зим}}) / W_{\text{нпу}}$	-0,333	-0,377	-0,312	-0,097	-0,254	-0,258	-0,297
$K_{\text{нап}} = W_{\text{срл}} / W_{\text{нпу}}$	-0,031	0,173	0,054	-0,044	0,029	-0,038	-0,028

Примечание. Здесь и в таблицах 3–5 жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на уровне 5 %.

Не обнаружено статистически значимой связи продуктивности водохранилища с наполненностью водохранилища водой во время цветения и средним за вегетационный период значением температуры воздуха.

Наличие значимой корреляционной связи с метеорологическими и гидрофизическими факторами, которые относятся к факторам прямого воздействия на фитопланктон, подтверждает их важное значение в формировании условий развития фитопланктона и изменчивости биомассы водорослей в летний период. В то же время невысокие значения коэффициентов корреляции показывают, что они не играют доминирующей роли в формировании средневегетационной продуктивности экосистемы водохранилища. Это косвенно подтверждается данными наблюдений за развитием фитопланктона в московских водохранилищах и водохранилищах водораздельного бьефа канала им. Москвы, в которых в аномально жаркие годы (1972, 2010) биомасса фитопланктона не достигала экстремальных величин. Модельный анализ влияния жарких периодов летом на развитие фитопланктона, выполненный

нами по сценарным расчетам аномалий жары 2010 года, показал сравнительно небольшое увеличение биомасс фитопланктона (не более 30 %) [Даценко, Пуклаков, 2016].

В целом величина средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона в водохранилище определяется биомассой синезеленых водорослей, с которой она связана с коэффициентом корреляции 0,957, в то время как ее коэффициент корреляции с диатомовыми водорослями равен 0,346.

Развитие синезеленых водорослей, как и фитопланктона в целом, в значительной мере определяется величиной биогенного притока, при этом здесь доминирует летняя биогенная нагрузка и отмечается тесная значимая связь фитопланктона с величиной водного притока в паводки. Действие этого фактора характеризуется пространственной однородностью – высокие коэффициенты корреляции характерны для всех участков водохранилища. Для синезеленых водорослей отмечены значимые связи с такими метеорологическими факторами, как количество штилей и осадки. Количество штилей в летний период связано

Таблица 3. Коэффициенты линейной корреляции длительности цветения фитопланктона (сутки) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,033	0,224	0,173	-0,195	-0,024	-0,056
Половодье, млн м ³	-0,094	0,120	0,051	-0,137	-0,390	-0,403
Паводки, млн м ³	0,492	0,172	0,010	-0,216	0,151	0,125
Интенсивность заполнения	0,336	0,109	0,278	0,103	0,309	0,297
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	-0,198	0,239	-0,043	-0,336	-0,484	-0,483
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,317	0,399	0,191	-0,240	0,204	0,185
Осадки, мм	0,317	0,163	0,109	-0,104	0,139	0,137
Ветер, м/с	-0,030	0,325	0,241	-0,281	-0,572	-0,600
Количество штилевых дней	0,089	0,471	0,406	0,397	0,572	0,553
Радиация, Вт/м ²	-0,191	-0,235	-0,237	0,215	0,381	0,421
Температура воздуха, °С	-0,363	-0,229	-0,269	0,413	0,526	0,557
Температура воды, °С	0,050	0,141	-0,063	0,105	0,484	0,582
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	-0,158	0,134	0,039	-0,217	-0,458	-0,473
Приток N за половодье, мг/м ² сут	-0,135	0,209	0,030	-0,263	-0,444	-0,455
Приток Р, мг/м ² сут	0,197	0,632	0,377	0,446	0,747	0,708
Приток N, мг/м ² сут	0,192	0,631	0,377	0,421	0,707	0,665
Регенерация Р, мг/м ² сут	0,073	0,426	0,179	0,402	0,599	0,616
Регенерация N, мг/м ² сут	-0,025	0,544	0,255	0,424	0,583	0,597
$K_{\text{овм}} = W_{\text{зим}} / W_{\text{пол}}$	0,037	-0,195	-0,149	0,328	0,442	0,459
$K_{\text{срб}} = (W_{\text{нпу}} - W_{\text{зим}}) / W_{\text{нпу}}$	0,083	0,274	0,185	-0,412	-0,423	-0,404
$K_{\text{нап}} = W_{\text{срп}} / W_{\text{нпу}}$	-0,421	-0,334	-0,215	0,353	-0,071	-0,110

с преобладанием антициклональной погоды, при которой усиливается внутрисуточная конвекция и возрастает вероятность вспышек развития этой группы водорослей. Эта связь наиболее ярко выражена в верхнем мелководном участке водохранилища, богатый биогенами гиполимнион которого более доступен воздействию внутрисуточной конвекции, чем гиполимнион остальной глубоководной части водоема. Летние осадки влияют на фитопланктон косвенно, поскольку определяют повышенный приток паводковых вод, роль которых уже отмечалась. Внутренняя нагрузка в результате диффузии биогенов из донных отложений значима только в верхней части водохранилища. Вероятно, это связано с более частыми перемешиваниями насыщенных биогенами придонных слоев в мелководной части водохранилища.

Для биомассы синезеленых водорослей не обнаружено значимой корреляционной связи с температурой воды и приходящей солнечной радиацией. Однако температура воды и температура воздуха могут быть хорошими предикторами продолжительности цветения водоема (табл. 3). Для большинства участков водохранилища отмечена положительная значимая связь температуры воды с длительностью сохранения

средней биомассы в поверхностном слое выше 1 мг/л. На продолжительность цветения по всему водоему оказывает существенное влияние и интенсивность внутренней биогенной нагрузки. Коэффициент предвесенней сработки водохранилища, на первый взгляд, не имеющий отношения к позднелетнему цветению синезеленых, значимо проявляет обратное влияние на эту группу водорослей. Этот коэффициент характеризует долю богатых биогенами зимних вод, остающихся в водохранилище к концу его заполнения, поэтому может косвенно влиять на формирование запаса биогенных веществ в водохранилище в вегетационный период.

Максимальные значения цветения синезеленых водорослей (табл. 4) лучше всего коррелируют с объемом паводков, поступлением с водосбора биогенных веществ за вегетационный сезон и количеством штилевых дней в период цветения водорослей. Высокие значения коэффициентов корреляции с другими факторами, такими как скорость продольного перемещения воды в водохранилище, количество атмосферных осадков, объясняется их непосредственной связью с поступлением в водоем паводковых вод.

Начало цветения синезеленых водорослей в водоеме тесным образом связано со средней

Таблица 4. Коэффициенты линейной корреляции максимальных значений биомассы фитопланктона (мг/л) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,210	0,255	0,123	0,332	0,354	0,230
Половодье, млн м ³	0,265	-0,149	0,060	-0,165	-0,251	-0,346
Паводки, млн м ³	0,022	0,238	-0,078	0,432	0,634	0,540
Интенсивность заполнения	0,240	0,153	0,299	0,001	0,155	0,204
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	0,023	-0,124	-0,211	-0,096	-0,299	-0,461
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,321	0,345	-0,035	0,403	0,621	0,527
Осадки, мм	0,035	0,178	-0,025	0,248	0,470	0,453
Ветер, м/с	0,180	-0,336	-0,210	-0,406	-0,223	-0,177
Количество штилевых дней	-0,007	0,519	0,270	0,662	0,387	0,281
Радиация, Вт/м ²	-0,092	-0,017	-0,144	0,040	0,076	0,087
Температура воздуха, °С	-0,151	-0,227	-0,140	0,132	0,039	0,012
Температура воды, °С	-0,310	0,160	0,142	0,094	0,001	0,048
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	0,159	-0,103	0,064	-0,183	-0,310	-0,437
Приток N за половодье, мг/м ² сут	0,187	-0,098	0,003	-0,185	-0,305	-0,445
Приток Р, мг/м ² сут	0,215	0,442	-0,034	0,716	0,882	0,836
Приток N, мг/м ² сут	0,202	0,450	-0,034	0,709	0,896	0,848
Регенерация Р, мг/м ² сут	-0,298	0,386	-0,014	0,357	0,164	0,145
Регенерация N, мг/м ² сут	-0,035	0,434	-0,047	0,374	0,159	0,122
$K_{овм} = W_{зим} / W_{пол}$	-0,024	-0,056	-0,117	0,141	0,236	0,357
$K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$	-0,298	0,075	-0,006	-0,300	-0,261	-0,326
$K_{нап} = W_{срп} / W_{нпу}$	0,171	-0,293	0,031	0,022	0,075	0,126

Таблица 5. Коэффициенты линейной корреляции даты начала цветения фитопланктона (сут от начала календарного года) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Половодье, млн м ³	0,142	0,099	0,047	0,133	0,292	0,278
Интенсивность заполнения	-0,351	-0,389	-0,391	-0,222	-0,247	-0,217
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	0,330	0,265	0,222	0,342	0,390	0,362
Температура воздуха в мае, °С	-0,021	-0,004	0,016	-0,414	-0,480	-0,568
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	0,160	0,103	0,049	0,186	0,344	0,337
Приток N за половодье, мг/м ² сут	0,172	0,102	0,050	0,225	0,332	0,324
$K_{овм} = W_{зим} / W_{пол}$	-0,398	-0,302	-0,270	-0,381	-0,447	-0,463
$K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$	0,522	0,443	0,438	0,463	0,427	0,414

температурой воздуха в мае (табл. 5): чем она выше, тем раньше следует ожидать начала цветения водорослей. Более раннему началу цветения синезеленых способствует также и более высокое значение соотношения объемов зимних вод водохранилища и водных масс поступившего половодья. Кроме этого, начало цветения синезеленых водорослей имеет значимую положительную корреляционную связь с коэффициентом предвесенней сработки водохранилища, скоростью продвижения весенних вод в водоеме и притоком биогенов.

Наименее предсказуемой по результатам статистического анализа следует считать

группу диатомовых водорослей. Для этой группы отмечено наименьшее количество значимых связей с факторами окружающей среды. Для диатомовых водорослей характерна большая пространственная неоднородность по акватории водоема в проявлении многочисленных косвенных абиотических воздействий. Значение средней биомассы цветения этой группы водорослей по всему водоему положительно коррелирует на значимом уровне только с интенсивностью весеннего половодья: чем медленнее происходит наполнение водохранилища, тем вероятнее более высокое значение средней биомассы цветения диатомовых

водорослей. Связано это, вероятно, с тем, что при слабом развитии весенних процессов на водосборе большая часть весенних вод поступает в водоем в виде более богатого биогенами почвенного, а не склонового стока, характерного для бурной весны. Кроме того, при длительной холодной весне в водоеме дольше поддерживаются благоприятные для холодолюбивых диатомовых водорослей температурные условия. Поступление биогенных элементов (и внешней и внутренней нагрузки) значимо коррелирует только с длительностью цветения и максимальными значениями биомасс диатомовых водорослей, причем только в средней части водохранилища. Следует заметить, что модельное воспроизведение режима биомассы диатомовых водорослей, в отличие от синезеленых, характеризуется острыми короткими пиками. При таком развитии цветения максимальные биомассы диатомовых водорослей в отдельные периоды могут быть более чувствительными к рассматриваемым предикторам, чем их средние значения в поверхностном слое. Выбранные нами показатели режима заполнения водохранилища в период половодья заметно влияют на развитие диатомовых водорослей только в верхнем участке водохранилища, где при высоком значении коэффициента водообмена влияние притока наиболее ощутимо. В центральном и нижнем районах водохранилища особенности пропуска половодья Можайским гидроузлом уже затушевываются погодными условиями. Слабо связана с абиотическими факторами и продолжительность развития диатомовых водорослей, что еще раз подтверждает крайнюю непредсказуемость цветения воды этой группой фитопланктона.

Заключение

Модельные расчеты многолетних колебаний интенсивности развития фитопланктона в вегетационный период предоставляют возможность многопланового корреляционного анализа факторов продуктивности водохранилища. В результате статистического анализа корреляционных связей характеристик цветения основных видов фитопланктона и комплекса выделенных абиотических факторов, включающего характеристики гидрологического режима водохранилища, гидрометеорологических условий в период вегетационного сезона, величину биогенной нагрузки на водоем, сделан ряд выводов относительно средней за вегетационный сезон продуктивности Можайского водохранилища:

- В водохранилище выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона.
- При большом объеме весеннего половодья следует ожидать снижения средней продуктивности водохранилища при условии отсутствия или незначительности летне-осенних дождевых паводков. При большом объеме летних паводков первичная продуктивность водоема резко возрастает. Таким образом, именно паводочный сток, формирующий внешнюю биогенную нагрузку на водоем в вегетационный сезон, определяет уровень развития фитопланктона водохранилища.
- Чем больше объем оставшихся в период заполнения водохранилища зимних вод по сравнению с объемом половодья, тем больше будет средняя продуктивность водохранилища.
- Величина предвесенней сработки водохранилища способствует понижению продуктивности водохранилища в вегетационный период.
- Температура воды и температура воздуха оказывают существенное влияние на продолжительность цветения водоема. Начало цветения синезеленых водорослей в водоеме тесно связано со средней температурой воздуха в мае.
- Наименее предсказуемо весеннее цветение воды в водоеме диатомовыми водорослями, которое наиболее слабо связано с основными абиотическими факторами.

Авторы выражают признательность сотрудникам Мосводоканала В. О. Полянину и Г. Т. Замане за предоставленную информацию по режиму работы Можайского гидроузла и качеству воды Приплотинного плеса Можайского водохранилища, а также всем коллегам, участвовавшим в сборе информации по гидрологическому режиму Можайского водохранилища.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-05-06108).

Литература

- Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Ред. К. К. Эдельштейн. М.: Перо, 2015. 286 с.*
- Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Температурный фактор интенсивности продукционных процессов в водохранилищах // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: Материалы V Всерос. конф. (Владимир, 11–14 октября 2016 г.). Владимир, 2016. С. 119–125.*

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище / Ред. В. Д. Быков, К. К. Эдельштейн. М.: Изд-во МГУ, 1979. 467 с.

Левшина Н. А. Структурные особенности фитопланктона Можайского водохранилища // *Комплексные исследования водохранилищ.* Вып. 5 / Ред. В. Д. Быков, И. М. Кисин, К. К. Эдельштейн. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 149–154.

Матарзин Ю. М., Мацкевич И. К. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ // Вопросы формирования водохранилищ и их влияния на природу и хозяйство. Вып. 1. Пермь, 1970. С. 27–45.

Пуклаков В. В., Замана Г. Т. Оценка оправдаемости модельного прогноза характеристик качества воды в Можайском водохранилище

в условиях аномальной жары // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. V Междунар. науч.-практ. конф. (29–31 мая 2015 г., Пермь), т. 2. Пермь, 2015. С. 144–149.

Урбах В. Ю. Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.

Chapra S. C., Reckhow K. H. Engineering Approaches for Lake Management. Vol. 1, 2. Boston: Butterworths, 1983. 492 p.

Thornton K. W., Lessem A. S. A Temperature Algorithm for Modifying Biological Rates // Transactions of the American Fisheries Society. 1978. Vol. 107, no. 2. P. 284–287.

Поступила в редакцию 13.03.2017

References

Gydroecologicheskii regim vodokhranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz) [Hydroecological regime of the reservoirs in Moscow Oblast (observations, diagnosis, forecasts)]. Ed. K. K. Edelstein. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Temperaturnyi factor intensivnosti produktsyonnykh protsessov v vodokhranilishchakh [The temperature factor of production processes intensity in reservoirs]. Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii. Materialy V vseross. konf. (Vladimir, 11–14 oktyabrya 2016 g.) [Ice and Thermal Processes in Water Bodies in Russia: Proceed. of the V All-Russ. Conf. (Vladimir, October 11–14, 2016)]. Vladimir, 2016. P. 119–125.

Kompleksnye issledovaniya vodokhranilishch. Vyp. 3. Mozhaiskoe vodokhranilishche [Integrated research of reservoirs. Iss. 3. The Mozhaisk reservoir]. Eds. V. D. Bykov, K. K. Edelstein. Moscow: MSU, 1979. 467 p.

Levshina N. A. Strukturnye osobennosti fitoplanktona Mozhaiskogo vodokhranilishcha [Structural features of phytoplankton in the Mozhaisk reservoir]. Kompleksnye issledovaniya vodokhranilishch. Vyp. 5 [Integrated Research of Reservoirs. Iss. 5]. Eds. V. D. Bykov, I. M. Kisin, K. K. Edel'shtein. Moscow: Izd-vo MGU, 1980. P. 149–154.

Matarzin Yu. M., Matskevich I. K. Voprosy morfometrii i raionirovaniya vodokhranilishch [Issues of morphometry and zonation of reservoirs]. Voprosy

formirovaniya vodokhranilishch i ikh vliyania na prirodu i khozyaistvo [Issues of Reservoirs Formation and their Impact on Nature and Economy]. Vol. 1. Perm', 1970. P. 27–45.

Puklakov V. V., Zamana G. T. Otsenka opravdyvaemosti model'nogo prognoza kharakteristik kachestva vody v Mozhaiskom vodokhranilishche v usloviyakh anomal'noi zhary [Assessment of model forecast accuracy of water quality characteristics in the Mozhaisk reservoir under anomalous heat conditions]. Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov. Trudy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konf. (Perm', 29–31 maya 2015 g.) [Modern Problems of Reservoirs and their Catchments. Proceed. of the V Int. Sci. and Pract. Conf. (Perm, May 29–31, 2015)]. Perm', 2015. P. 144–149.

Urbakh V. Yu. Biometricheskie metody [Biometric methods]. Moscow: Nauka, 1964. 415 p.

Chapra S. C., Reckhow K. H. Engineering Approaches for Lake Management. Vol. 1, 2. Boston: Butterworths, 1983. 492 p.

Thornton K. W., Lessem A. S. A Temperature Algorithm for Modifying Biological Rates. *Transactions of the American Fisheries Society.* 1978. Vol. 107, no. 2. P. 284–287.

Received March 13, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Даценко Юрий Сергеевич

доцент, д. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470

CONTRIBUTORS:

Datsenko, Yuri

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Пуклаков Валерий Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: puklakov@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Эдельштейн Константин Константинович

профессор, д. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: emek05@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Puklakov, Valery

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: puklakov@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Edelstein, Konstantin

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: emek05@mail.ru
tel.: (495) 9395470

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 551.8:551.794 (282.247.211)

ИЗУЧЕНИЕ ПАЛЕОГЕОГРАФИИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО БАССЕЙНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ

Л. В. Филимонова¹, Н. Б. Лаврова²

¹ Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

² Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В статье обобщены авторские и литературные данные многолетних палеогеографических исследований Онежского озера и его бассейна, проведенные с использованием комплекса методов. Рассмотрены вопросы дегляциации, трансгрессивно-регрессивной деятельности Онежского озера, времени и особенностей образования малых озер, их уровня режима, перехода некоторых из них на тельматический путь развития. Согласно данным, территория исследования начала освобождаться от ледникового покрова ~ 13000–14000 л. н. Дегляциация котловины озера завершилась 11600 л. н., всего современного водосборного бассейна – в конце аллереда. Уровень образовавшегося Онежского приледникового озера колебался. По мере его снижения приблизительно со времени 12300 л. н. происходило отделение и обособление в депрессиях малых и средних палеоводоемов. Формировались также озера в понижениях рельефа на территориях, не залитых приледниковыми водами. Для юго-восточной Карелии характерно образование озер в результате таяния мертвых льдов (с аллереда до конца бореала). Формирование органических отложений в озерах отмечено со времени ~ 10300 л. н. Накопление торфа в неглубоких депрессиях началось также в пребореале, в прибрежной части ряда исследованных палеоводоемов – в бореале. К концу суббореала большинство их заторфовалось. Реконструкции динамики растительности выполнены со среднего дриаса (~12000 л. н.) до современности на фоне изменения природной среды, в том числе палеоклимата и гидрологии, а также с учетом геоморфологии территории и антропогенного воздействия. Установлено, что состав и динамика растительности в позднеледниковье и голоцене определялись климатическими факторами, а их специфичность – геолого-геоморфологическими. Расселение растений происходило по мере освобождения территории от ледника и приледниковых вод. Последние, а также остаточные массивы мертвого льда задерживали формирование растительного покрова.

Ключевые слова: палеогеография; палеолимнология; дегляциация; микро- и макрофоссилии; динамика растительности; позднеледниковье; голоцен; Карелия; Онежское озеро.

L. V. Filimonova, N. B. Lavrova. THE STUDY OF LAKE ONEGO AND ITS DRAINAGE BASIN PALEOGEOGRAPHY USING A SET OF METHODS

The authors own and literary data on long-term paleogeographical research of Lake Onego and its drainage basin carried out using a set of methods are summarized in the article. The deglaciation, transgressive-regressive activity of Lake Onego, time and features of the formation of small lakes, their water level regime and the transition of some of them to a telmatic development pathway are discussed. According to available data, deglaciation of the study area began at ~ 13000–14000 BP. The deglaciation of the lake was completed at 11600 BP and that of the modern catchment at the end of the Alleröd. The water level of the newly formed periglacial Lake Onego was variable. As the level was decreasing starting from around 12300 BP, small and medium-sized paleolakes became separated and isolated in depressions. There also formed lakes produced by stagnant ice melting (from the Alleröd to the end of the Boreal Period) and lakes in areas not flooded by periglacial waters. The formation of organic sediments in the lakes is shown to have commenced at ~ 10300 BP. Peat accumulation in shallow depressions also began in Preboreal time and that in the near-shore zone of the investigated paleolakes in Boreal time. Most of them were filled with peat by the end of the Sub-Boreal period. Vegetation dynamics was reconstructed from the Middle Dryas (DR2, ~ 12000 BP) to the present as related to changes in the environment, including the paleoclimate and hydrology of the territory, and taking into account the geomorphology of the territory and human impact. It was established that the composition and dynamics of vegetation in the Late Glacial and Holocene were controlled by climatic factors, while their distinctive characteristics by geologo-geomorphological factors. Plants were dispersing as the territory was liberated from ice and periglacial waters. The latter, as well as residual arrays of stagnant ice, delayed the formation of the plant cover.

Key words: paleogeography; paleolimnology; deglaciation; micro- and macrofossils; vegetation dynamics; Late Glacial; Holocene; Karelia; Lake Onego.

Введение

Онежское озеро – второй по величине пресноводный водоем Европы. Его площадь – 9720 кв. км, протяженность с севера на юг – 248 км, с запада на восток – 96 км, средняя глубина – 30 м, максимальная – 120 м, уровень водного зеркала – 33 м н. у. м. В озеро впадает 52 реки длиной более 10 км; сток из него осуществляется по реке Свирь, впадающей в Ладожское озеро. Водосборный бассейн Онежского озера (53 100 кв. км) сложен труднорастворимыми архейско-протерозойскими породами, что обуславливает низкую минерализацию как притоков, так и самого водоема [Онежское озеро..., 2010]. Озеро и его бассейн вытянуты в северо-западном направлении на 400 км, что позволяет проследить особенности деградации последнего Скандинавского ледникового покрова и его влияние на озерно-ледниковый седиментогенез до заключительных стадий оледенения (сальпаусселькя-II), а также пространственно-временную динамику растительности с позднеледниковья до современности.

Палеогеографические исследования Онежского озера и его бассейна имеют более чем 150-летнюю историю. Большой вклад в изучение этого региона внесли сотрудники

лаборатории четвертичной геологии и палеоэкологии Института геологии и лаборатории болотных экосистем Института биологии КарНЦ РАН, в том числе при их совместном сотрудничестве и в содружестве с другими российскими и зарубежными коллегами из Швеции, Финляндии, Чехии и Белоруссии.

Методические вопросы и результаты исследований в виде лекции обсуждались на V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика)» [Филимонова, Лаврова, 2016]. В данной публикации кратко рассмотрены методы отбора и проведенных исследований, а также представлены основные палеогеографические данные и реконструкции, полученные по Онежскому озеру и его бассейну в названных лабораториях, в том числе авторами статьи.

Материалы и методы

Исследованы различные типы отложений: озерные, болотные, аллювиальные, золовые, флювиогляциальные и др. При этом изучали обнажения природного (берега рек и озер) и искусственного (карьеры, каналы и др.) происхождения, делали расчистки форм рельефа

различного генезиса (камы, озы, флювиогляциальные дельты и др.), копали шурфы, бурили скважины (на озерах и болотах).

При расчистке стенки естественного обнажения углубление в нее делали ступенями. Замеры мощности слоев и отбор образцов на различные виды анализов осуществляли по вертикальной фронтальной стенке ступени. Для контроля измеряли высоту всего разреза с помощью рулетки и эклиметра.

Отбор донных отложений Онежского озера осуществляли в период открытой воды с исследовательского судна. На малых озерах бурение проводили с лодки, в прибрежной зоне – со сплавины, в зимнее время – со льда. Поверхностные образцы получали с использованием пробоотборника «Лимнос».

Отбор торфов и залегающих под ними озерных отложений осуществляли с использованием бура Инсторфа, самых нижних слоев – буром Гиллера, имеющим более короткий «нос». Бурение скважин в основном проводили на стратиграфических профилях. Так, на болоте Чечкино (62°18' с. ш., 33°59' в. д., 54 м н. у. м., 270 га) на продольном и поперечном стратиграфических профилях для определения ботанического состава торфа и степени его разложения было отобрано восемь разрезов, на палинологический анализ – три разреза (один в наиболее глубокой центральной скважине и два на периферии болота) с целью детализации пространственно-временной динамики суходольной и водно-болотной растительности [Филимонова, 2005, 2010, 2011].

При палеогеографических исследованиях использовали геоморфологический, седиментологический и стратиграфический методы. Предварительное выделение минеральных и органогенных слоев проводили в полевых условиях. В лаборатории эти данные уточняли, в том числе с использованием микроскопа.

Для датирования отложений использовали радиоуглеродный метод (в том числе AMS-датирование), варвометрический и биостратиграфические методы. Радиоуглеродные датировки применяли для определения абсолютного возраста отложений, при периодизации спорово-пыльцевых диаграмм, установлении временных границ палинозон и сукцессий растительных палеосообществ, а также хронологии изменений природной среды. AMS-датирование позволило определить возраст отложений, содержащих незначительное количество органического вещества (0,2–1 г), в том числе позднеледниковых отложений (глин и алевроитов). С использованием этого метода был установлен возраст «розового горизонта»

ленточных глин, который является маркерным для отложений Онежского озера и озер, ранее входивших в его состав. Этот слой образовался в конце аллёрета при падении уровня Онежского приледникового озера и обогащении придонных вод кислородом, в результате чего произошло насыщение отложений окислами железа, придавшими им розовато-коричневый цвет [Демидов, 2006а]. Возраст подошвы «розового горизонта» составляет примерно 11 250 лет, а его кровли – 11 150 лет [Saarnisto, Saarinen, 2001]. С учетом этих значений рассчитан возраст позднеледниковых отложений при варвометрических исследованиях, заключающихся в подсчете ленточных глин, накопившихся в приледниковых водоемах.

При изучении истории развития Онежского озера и озер его бассейна особое значение имел диатомовый анализ [Давыдова, 1976; Филимонова, Шелехова, 2005; Шелехова и др., 2005; Шелехова, Лаврова, 2016], в ходе которого определяли таксономический состав диатомовых водорослей, их численность, экологическую и географическую принадлежность. Этот метод помогает решать вопросы, касающиеся генезиса отложений, а также используется при реконструкции колебаний уровня водоемов, изменений температуры, степени минерализации и солености воды в них. Кроме того, диатомеи являются индикаторами антропогенного воздействия на озерные экосистемы.

При палинологическом анализе определяли пыльцу, споры и непыльцевые палиноморфы (остатки водорослей *Botryococcus* и *Pediasrum*, устьица хвойных пород, яйца тихоходки и др.), а также дочетвертичные спороморфы и угольные частицы. Полученные данные использованы при реконструкции динамики растительности, климата, колебаний уровня водоемов и других изменений природной среды в позднеледниковые и голоцене, а также для определения относительного возраста отложений в разрезах Онежского озера и в разрезах озерных, аллювиально-озерных и озерно-болотных отложений из его бассейна.

Для увеличения достоверности реконструкций динамики суходольной растительности использованы данные о составе субрецентных палиноспектров из района исследования (179 образцов) и других регионов, «поправочные коэффициенты» для пыльцы древесных пород [Филимонова, 2005, 2007 и др.], палеоэкологический анализ [по: Гричук и др., 1969] и определения концентрации пыльцы в отложениях методом «маркирующих» спор [по: Stokmar, 1972].

При проведении реконструкций суходольной и водно-болотной растительности особое

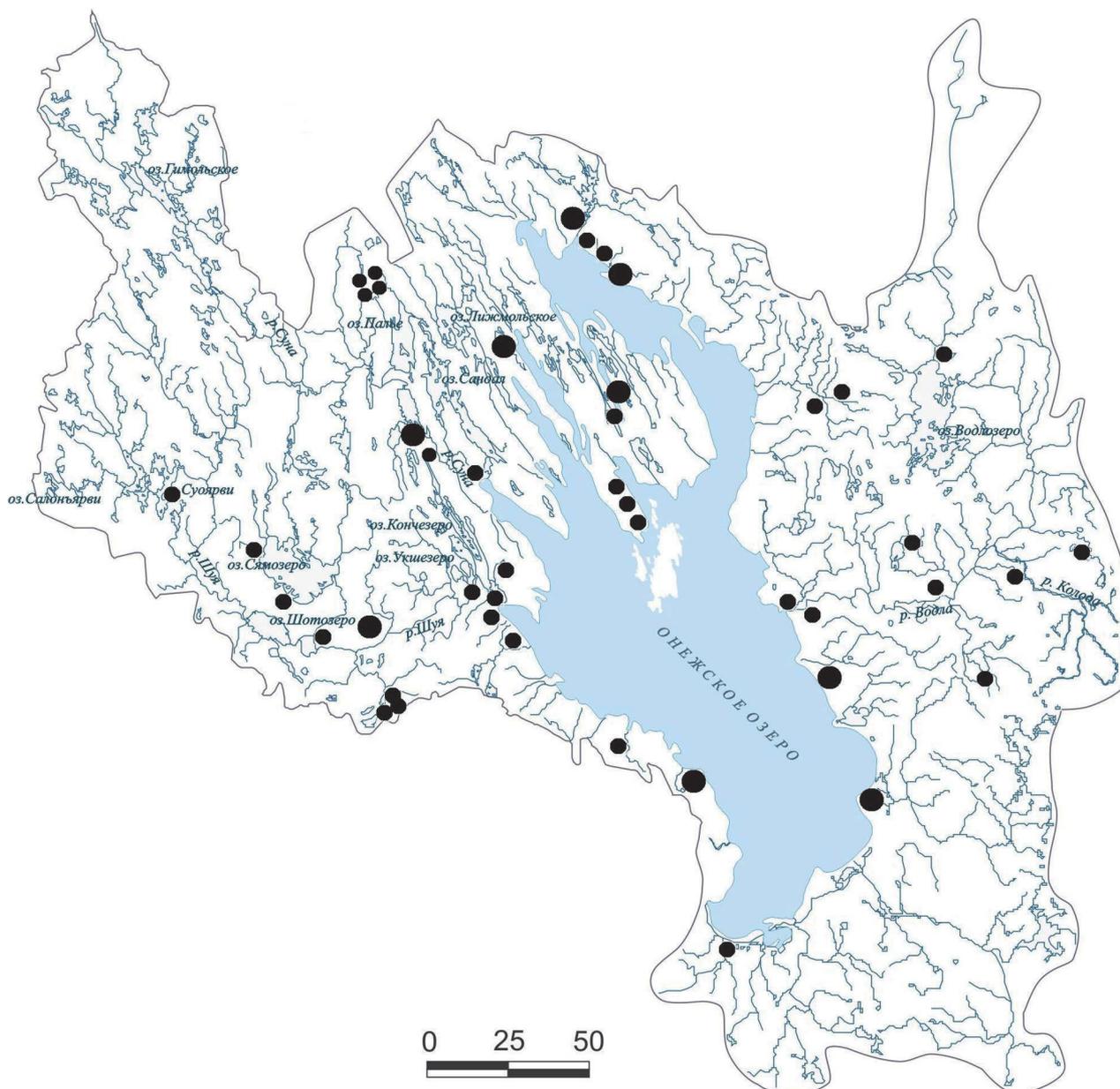


Рис. 1. Картограмма местоположения модельных территорий (МТ), исследованных палинологически, в пределах бассейна Онежского озера [по: Онежское озеро..., 2010]

Большими точками обозначены МТ, для которых получены 4–11 СПД

значение имело также привлечение данных о макрофоссильных остатках высших и низших растений, в том числе плодов, семян и макроспор, в исследуемых отложениях. Их находки в озерных отложениях свидетельствуют о произрастании идентифицированных по ним растений в водоеме или близ него.

Определение ботанического состава и степени разложения торфа выполнены (аналитики А. А. Белова и Н. В. Стойкина) по общепринятым методикам [Короткина, 1939; Минкина, Варлыгин, 1939]. На основе этих данных получены реконструкции сукцессий болотной растительности, пространственно-временной динамики

зарастания и заторфовывания водоемов, а также вертикального и горизонтального роста болот. Расчеты индексов влажности реконструированных болотных палеосообществ [по: Елина, Юрковская, 1992] использованы при характеристике изменений уровня грунтовых вод на болоте, а также гидрологического режима территории [Филимонова, 2008, 2010, 2011 и др.].

Результаты и обсуждение

Палеогеографические реконструкции, выполненные для Онежского озера и его бассейна, опираются на данные 104 (в том числе

35 авторских) спорово-пыльцевых диаграмм (СПД) озерных и озерно-болотных отложений (рис. 1), результаты карпологического анализа (4 разреза) и определения макроостатков растений (82 разреза). Возраст отложений и палеогеографических событий установлен с использованием 150 радиоуглеродных датировок, варвометрических исследований (5 разрезов) и периодизации СПД.

Реконструкции пространственно-временной динамики растительности получены на фоне изменения климата [Филимонова, Климанов, 2005, 2008], дегляциации территории [Демидов, 2005] и трансгрессивно-регрессивной деятельности Онежского озера [Девятова, 1986; Демидов, 2005, 2006б] в позднеледниковье и голоцене. При этом учтены данные по геоморфологии [Лукашов, Демидов, 2001; Лукашов, 2003 и др.] и неотектонике территории [Лукашов, 1976; Елина и др., 1994], составу четвертичных отложений [Лукашов, Демидов, 2001; Демидов, 2003 и др.] и антропогенное воздействие.

Построены уточненные палеоклиматические кривые t_{cp}° января, t_{cp}° июля, t_{cp}° года и среднегодового количества осадков за последние 11000 лет по 4 СПД из заповедника «Кивач» (62°18' с. ш., 33°55' в. д.); проведено их сопоставление с реконструкциями, имевшимися ранее для четырех других модельных территорий, расположенных в среднетаежной подзоне Карелии, в бассейне Онежского озера [Филимонова, Климанов, 2005, 2008].

При характеристике палеогидрологии территории и истории развития конкретных водоемов использованы данные по геоморфологии территории, хроностратиграфии и скорости накопления озерных и болотных отложений, пыльце, спорам и макроостаткам водно-болотных растений, диатомовым и зеленым водорослям. Получены реконструкции колебания относительного уровня ряда палеоводоемов [Filimonova et al., 1996a, b и др.], интенсивности их зарастания и заторфовывания, данные по сукцессиям и изменениям индекса влажности болотных палеосообществ в местах отбора колонок отложений [Филимонова, 2008, 2010, 2011 и др.].

Проведенное сопоставление реконструкций динамики растительности с палеоклиматическими кривыми, неотектоникой территории, изменением уровня воды в Онежском озере и других палеоводоемах (рис. 2) позволило получить более полную картину палеогеографической обстановки в районе исследований в позднеледниковье и голоцене.

Анализ полученных и литературных данных свидетельствует о том, что территория

южной и восточной Карелии освободилась от материкового льда 13000–14000 л. н. вследствие резкого глобального потепления в интерстадиале бёллинг. Дегляциация котловины Онежского озера происходила довольно быстро (1–1,5 км/год). Она началась ~ 12400 л. н. и закончилась ~ 11600 л. н., когда ледник отступил от северной части Заонежского п-ова [Демидов, 2005, 2006б]. В ходе его деградации в котловине Онежского озера и на прилегающих низменностях сформировался крупный приледниковый водоем, площадь и уровень которого неоднократно менялись в зависимости от положения края ледника, гляциоизостатических движений земной коры и эрозионной деятельности в районах порогов стока. Водоем входил в систему Верхневолжских озер, уровень воды которых составлял 120–130 м н. у. м. [Квасов, 1976]. Открытие стока по сквозной долине рек Ошта – Тукша – Оять в бассейн Балтики ~ 12500–12400 л. н. привело к снижению уровня Онежского приледникового озера до 106 м [Демидов, 2006б]. Примерно 12300 л. н. край ледника отступил из долины р. Свирь, и водоем получил новый, более низкий порог стока в Балтику [Saarnisto, Saarinen, 2001], а уровень воды в его южной части снизился до 85–75 м. В результате деградации ледника, освобождения новых территорий и поступления талых ледниковых вод Онежский приледниковый водоем к концу аллереда (~11400 л. н.) достиг максимальных размеров, а уровень воды в нем поднялся до 115–130 м н. у. м. Во время регрессии 11300 л. н. вследствие гляциоизостатического поднятия земной коры и открытия нового порога стока в Белое море, а затем в Ладожское озеро он упал на 20–25 м. Следующее значительное его снижение (на 20 м) произошло ~ 10300 л. н. после открытия стока через р. Свирь в Ладогу. В голоцене уровень Онежского озера при общей тенденции к понижению значительно колебался (рис. 2) в зависимости от гляциоизостатического поднятия территории, изменения количества атмосферных осадков и эрозионных процессов в районе порога стока р. Свирь [Девятова, 1986; Демидов, 2006б].

По мере снижения уровня Онежского приледникового озера происходило увеличение площади суходолов, отделение и обособление малых и средних палеоводоемов в имеющихся депрессиях [Филимонова, 2010, 2011 и др.]. В южном Прионежье некоторые озера перешли на самостоятельный путь развития уже в среднем дриасе. Наиболее древнее из исследованных оз. Горнозеро (60°42' с. ш., 35°47' в. д., 95 м н. у. м.) расположено примерно в 25 км от южного побережья современного

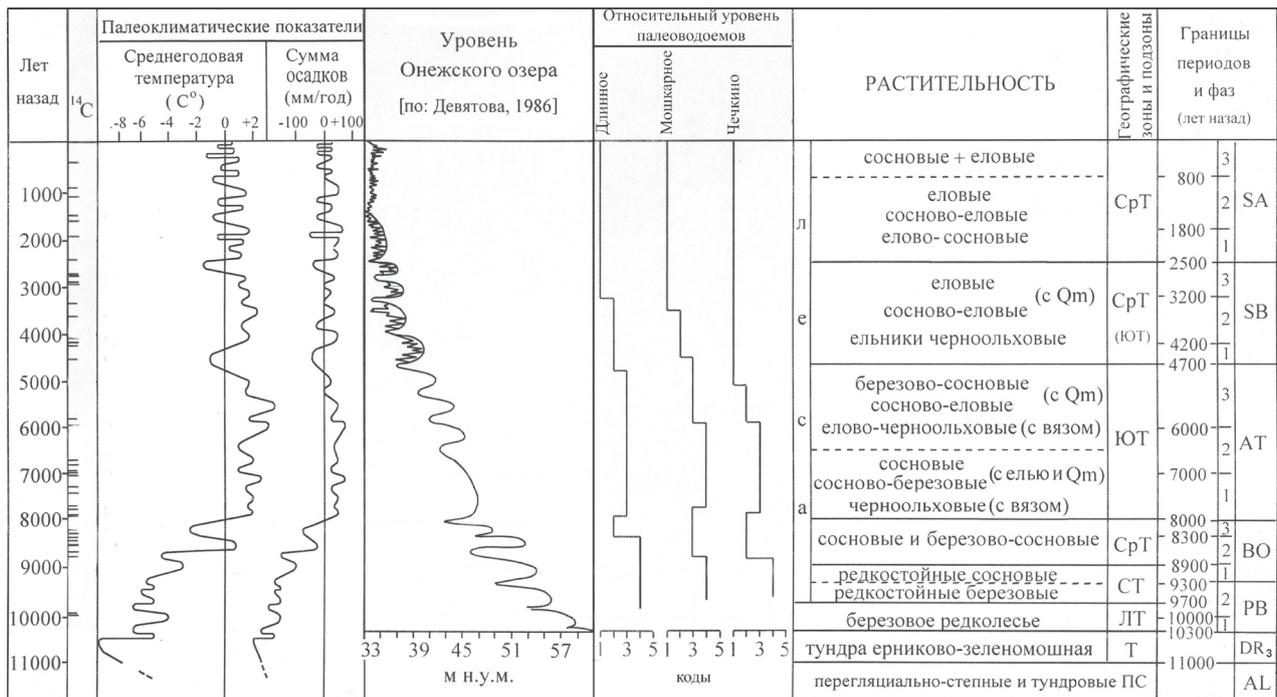


Рис. 2. Корреляция динамики растительности на МТ «Кивач» с изменениями климата и уровня воды Онежского озера и исследованных палеоводоемов в позднеледниковье и голоцене

ПС – палеосообщества, Т – тундра, ЛТ – лесотундра, СТ – северная тайга, СрТ – средняя тайга, ЮТ – южная тайга, Qm – широколиственные породы; AL – аллёрд, DR₃ – поздний дриас, PB – пребореал, BO – бореал, AT – атлантический период, SB – суббореал, SA – субатлантический период

Онежского озера, у дистального склона мощной конечно-моренной гряды. Из органических слоев в алевритах получена датировка 11500 ± 230 л. н. (LE-6528). Ниже датированного горизонта двухметровая толща песчаных алевритов залегает на метровом слое ленточных глин. Завершение формирования ленточных глин, включающих около 100 годичных лент, и переход к накоплению алевритов в разрезе Горнозеро отражает падение уровня Онежского приледникового озера с 106 до 80 м в связи с открытием стока по р. Свирь. С этого времени Горнозеро развивается как самостоятельный водоем. Поскольку открытие р. Свирь произошло ~ 12250 л. н. [Saarnisto, Saarinen, 2001], накопление метровой толщи ленточных глин Горнозера началось ~ 12350–12500 л. н. [Демидов, 2005]. Согласно данным [Лаврова, Субетто, 2016], в спорово-пыльцевых спектрах среднего дриаса количество пыльцы древесных составило не менее 50 %. Часть пыльцы древесных была дальнезаносной, часть переотложенной, что подтверждается низкой концентрацией пыльцы, одновременным присутствием дочетвертичных спороморф и пыльцы широколиственных пород. Кроме того, в соответствии с палеогеографическими реконструкциями, основанными на строении поверхностных

отложений и слагаемых ими форм рельефа, в южной Карелии в среднем дриасе были чрезвычайно широко распространены поля мертвых льдов [Демидов, 2005]. Суровый климат, близость ледникового покрова и отсутствие сформированных почв не благоприятствовали произрастанию древесных пород. На свободной от блоков мертвого льда территории основной фон ландшафта был представлен оголенными минеральными субстратами и пионерными перигляциальными сообществами.

Малые озера развивались также в понижениях рельефа на больших высотах и территориях, не залитых приледниковыми водами. Для юго-восточной Карелии характерно образование озер в результате таяния мертвых льдов. Массивы их сохранялись длительное время, существенно задерживая формирование ландшафтов, озерно-речной сети и растительности [Демидов, Лаврова, 2001; Лаврова, Демидов, 2003; Демидов, 2006б]. Согласно полученным данным, первые малые озера образовались в аллереде, что подтверждено радиоуглеродными датировками: 11365 ± 95 л. н. (UA-12391) [Wohlfarth et al., 1999], 11635 ± 225 л. н. (UA-14013) [Wohlfarth et al., 2002], 11500 ± 220 л. н. (TA-1584), 11500 ± 150 л. н. (TA-1674), 11200 ± 200 л. н. (TA-1827) [Лаврова, 2006], некоторые – в позднем

дриасе (10500 ± 125 л. н. (Ua-14805) [Wohlfarth et al., 2004]). Следующий этап озерообразования отмечен в бореале (9100 ± 110 л. н., LE-6796) [Демидов, 2005]. На ледораздельных возвышенностях образование некоторых озер зафиксировано в начале атлантического периода (7900 ± 90 л. н., ЛУ-6777) [Шелехова, Лаврова, 2016].

Улучшение климатических условий в голоцене и обмеление малых водоемов вызвало интенсивное развитие в них планктона, бентоса, гигро- и гидрофитов, что способствовало отложению сапропеля. Так, в оз. Малое Безымянное ($61^{\circ}31'$ с. ш., $33^{\circ}39'$ в. д., 280 м н. у. м.) его накопление отмечено с начала пребореального периода (10200 ± 150 л. н., TA-1675), а в озерах Гурвич ($61^{\circ}38'$ с. ш., $34^{\circ}17'$ в. д., 198 м н. у. м.) и Суярлампи ($61^{\circ}30'$ с. ш., $33^{\circ}28'$ в. д., 147 м н. у. м.) с меньшими гипсометрическими отметками – несколько позже (9600 ± 200 л. н., TA-1583 и 9700 ± 200 л. н., TA-1687 соответственно) [Лаврова, 2006]. В палеоводоемах, перешедших в дальнейшем на тельматический путь развития, прослеживалась такая же закономерность. При этом существенное значение имело также время образования озер, которое в первую очередь определялось освобождением территории от ледника и приледниковых вод. Так, в палеоводоеме Пичозеро ($67^{\circ}47'$ с. ш., $37^{\circ}25'$ в. д., 118 м н. у. м.), расположенном к востоку от Онежского озера, базальные слои сапропеля сформировались 9640 ± 205 л. н. (Ua-14807) [Wohlfarth et al., 2004], а в Чечкино ($62^{\circ}18'$ с. ш., $33^{\circ}59'$ в. д., 54 м н. у. м.) и Мошкарное ($62^{\circ}17'$ с. ш., $33^{\circ}55'$ в. д., 57 м н. у. м.), находящихся к северо-западу от него, – только во второй половине бореала (8680 ± 60 л. н., TA-1506 и 8570 ± 130 л. н., ЛУ-2228 соответственно) [Филимонова, 2005, 2010, 2011].

Дальнейшее снижение уровня воды в некоторых озерах способствовало их зарастанию водно-болотной растительностью и последующему заторфовыванию. В неглубоких депрессиях эти процессы имели место уже в пребореальном периоде. Это подтверждено датированием лежащих на маломощном сапропеле базальных слоев торфа (9950 ± 70 л. н., SU-3585; 9890 ± 70 л. н., SU-3587), отобранных под болотными лесами на территории заповедника «Кивач». Здесь же торфонакопление в прибрежной части ряда палеоводоемов, занимающих достаточно глубокие депрессии, началось в ВО-3 (8250 ± 80 л. н., TA-890; 8130 ± 120 л. н., TA-1942) [Филимонова, 2010, 2011 и др.]. Для этого времени характерны похолодание климата и уменьшение среднегодового количества осадков [Филимонова,

Климанов, 2005, 2008], неотектонические подвижки кристаллического фундамента [Лукашов, 1976; Елина и др., 1994], снижение уровня воды в Онежском озере [Девятова, 1986; Демидов, 2006б] и других палеоводоемах [Filimonova et al., 1996a, b; Филимонова, 2010, 2011, 2015 и др.], а также максимальное распространение среднетаежных сосновых лесов [Филимонова, 2005, 2012, 2015 и др.] (рис. 2).

В начале атлантического периода (АТ) отмечен подъем уровня воды во всех изученных палеоозерах (рис. 2). Некоторое его уменьшение зафиксировано ~ 6500 и $5900\text{--}5800$ л. н., увеличение – 6200 и 5750 л. н. Существенное снижение уровня воды в АТ-3 (после 5600 л. н.) и в суббореале ($4700\text{--}2500$ л. н.) вызвало дальнейшее их обмеление и окончательное заторфовывание [Filimonova et al., 1996a, b; Филимонова, 2012 и др.]. Полученные реконструкции сукцессий водно-болотной растительности и пространственно-временной динамики роста ряда болот опубликованы [Филимонова, 2010, 2011 и др.]. Установлено, что неотектонические подвижки кристаллического фундамента вызвали изменение формы котловин и смещение одновозрастных слоев торфяных отложений ряда болот [Елина и др., 1994; Филимонова, 2010, 2011 и др.].

На исследованных модельных территориях (МТ) из бассейна Онежского озера выполнены детальные реконструкции динамики суходольной растительности со среднего дриаса (DR_2) до современности. Установлено, что расселение растений происходило по мере освобождения территории от ледникового покрова, причем раньше на МТ, удаленных от приледниковых водоемов, образовавшихся при его таянии. На ряде МТ, залитых водами Онежского приледникового озера (например, в Заонежье), отмечено запаздывание развития растительного покрова, который изначально мог формироваться только на отдельных островах, поднимавшихся над водной поверхностью. Появление новых участков суши по мере снижения уровня воды в нем способствовало продолжительному существованию здесь палеосообществ, характерных для несформированных почв [Елина, Филимонова, 1999; Елина и др., 1999; Filimonova, Lavgova, 2014; Филимонова, Лаврова, 2015]. Кроме того, развитие растительности по отношению ко времени дегляциации задерживалось и на территориях с длительным сохранением массивов погребенного мертвого льда, главным образом в южной и юго-восточной Карелии: МТ «Пичозеро» [Wohlfarth et al., 2004], «Тамбичозеро» [Wohlfarth et al., 2002] и ряд МТ на Онежско-Ладожском водоразделе [Лаврова, 2006].

В центральной и западной частях бассейна Онежского озера оно начиналось в основном сразу же после отступления ледника [Филимонова, Еловичева, 1988; Филимонова, 1995, 2005; Лаврова, 2005б и др.]. Распространение и развитие растительности контролировалось как климатическими, так и геолого-геоморфологическими факторами. Первые определили состав и два тренда развития зональной растительности с переходным этапом в суббореале (рис. 2). Рельеф и состав коренных кристаллических пород обусловили специфичность растительного покрова изученных МТ.

Реконструкции динамики растительности выполнены на фоне изменения климата, дегляциации территории и трансгрессивно-регрессивной деятельности Онежского озера в позднеледниковье и голоцене. При этом были учтены данные геоморфологии территории, состава четвертичных отложений и антропогенное воздействие. Реконструкции сделаны в виде подробного описания палеогеографической обстановки, динамики сухоходольной и водно-болотной растительности [Филимонова, Еловичева, 1988; Филимонова, 1995, 2005, 2011, 2012, 2015; Демидов, Лаврова, 2001; Лаврова, 2004, 2005а, б; Filimonova, Lavrova, 2014; Филимонова, Лаврова, 2015; Шелехова, Лаврова, 2016 и др.].

Согласно данным, глобальное потепление в голоцене вызвало постепенную смену перигляциально-степных и тундровых сообществ, характерных для аллереда (AL) и позднего дриаса (DR_3), лесотундровым березовым редколесом в пребореале (PB). Березовые и сосново-березовые редкостойные северотаежные леса появились в конце PB (~9700–9600 л. н.). Среднетаежные сосновые леса распространились в бореале (BO) и стали доминирующими 8900–8000 л. н. с максимумом 8300–8000 л. н. Потепление и увеличение влажности климата с начала атлантического периода (AT) благоприятствовали расселению *Ulmus*, *Quercus*, *Tilia*, *Corylus* и *Alnus glutinosa*, особенно в интервале 7000–6000 л. н. Растительность приобрела южнотаежный облик. Наряду с сосновыми и сосново-березовыми лесами во второй половине AT-периода распространились ельники, которые стали преобладающими на значительной части территории исследования во второй половине суббореала (SB). В субатлантическое время (SA) их доля в составе лесов уменьшилась, особенно в SA-3, после 800 л. н. (рис. 2).

Для ряда МТ из бассейна Онежского озера получены различного рода рисунки, карты и схемы динамики сухоходольной и водно-болотной растительности в позднеледниковье

и голоцене. Для примера приведена схема динамики сухоходольной растительности на МТ «Кивач»: перигляциально-степные и тундровые палеосообщества (ПС) в сочетании с островными березовыми и ольховыми редколесьями [AL: 11500–11000 л. н.] → тундра ерниково-зеленомошная в сочетании с перигляциальными ПС и присутствием островных березовых и ольховых редколесий [DR_3 : 11000–10300 л. н.] → лесотундра: березовое (с примесью сосны и ольхи) редколесье в сочетании с ерниково- и кустарничково-зеленомошными тундрами, а также с присутствием перигляциально-разнотравных ПС [PB-1,2: 10300–9700 л. н.] → северная тайга: редкостойные березовые (с примесью сосны и ольхи) леса [PB-2: 9700–9300 л. н.] → редкостойные сосново-березовые и сосновые леса [BO-1: 9300–8900 л. н.] → средняя тайга: сосновые и березово-сосновые леса [BO-2,3: 8900–8000 л. н.] → южная тайга: сосновые, сосново-березовые и черноольховые леса с широколиственными породами и лещиной (Qm), а также елью [AT-1,2: 8000–6500 л. н.] → березо-сосновые и сосново-еловые леса с Qm, елово-черноольховые с вьзом леса [AT-2,3: 6500–4700 л. н.] → средняя тайга (южный вариант): еловые и сосново-еловые леса с березой и примесью Qm, ельники черноольховые (SB: 4700–2500 л. н.) → средняя тайга: еловые, сосново-еловые и елово-сосновые леса с березой и ольхой (SA-1,2: 2500–800 л. н.) → сосновые и еловые леса с березой и ольхой (SA-3: 800 л. н. – настоящее время) [Филимонова, 2005, 2012, 2015 и др.].

На МТ «Заонежье» полыни и маревые играли существенную роль в растительном покрове до конца PB (~9300 л. н.), встречались в BO и AT-1. Как и на МТ «Кивач», участие ели в составе лесов увеличилось во второй половине AT-периода. Она имела здесь большее распространение, которое уменьшилось в SA время, особенно в последние 1000 лет [Filimonova, Lavrova, 2014; Филимонова, Лаврова, 2015]. Максимальное участие ели в растительном покрове отмечено на МТ «Пичозеро». Здесь, а также в отложениях разреза Тамбичозеро начиная с позднеледниковья до современности встречались пыльца и устьица лиственницы [Филимонова, 2015; Kuosmanen et al., 2016a, b], произрастающей на юго-востоке Карелии и в настоящее время. Широколиственные породы и лещина наибольшее распространение имели в AT-периоде (особенно в AT-2 и AT-3). В SB их участие в составе лесов несколько уменьшилось. До настоящего времени *Tilia cordata* и *Ulmus laevis* в незначительном количестве сохранились в Пудожском флористическом районе. В заповеднике «Кивач» местами произрастают *Tilia cordata* и *Ulmus*

scabra. Все три вида еще более представлены в Заонежье, что в значительной степени обусловлено наличием карбонатных и шунгитовых пород. Для последних двух МТ характерны также елово-черноольховые топи. Коренные хвойные леса в Заонежье в основном вырублены; роль производных лесов, лугов и сельхозугодий, в том числе заброшенных и заросших ольхой и другими кустарниками, весьма значительна. Это нашло отражение в полученных СПД и рассматривалось как проявление антропогенного фактора [Елина, Филимонова, 1999; Filimonova, Lavrova, 2014; Филимонова, 2015; Филимонова, Лаврова, 2015 и др.]. Появление пыльцы культурных злаков (*Cerealia*) и сопутствующих им сеgetальных видов свидетельствует о начале земледелия на территории Заонежского полуострова ~ 1100–900 л. н. Это подтверждается радиоуглеродными датировками 1140 ± 50 л. н. (ЛЕ-6531) и 950 + 110 л. н. (ЛЕ-6796), полученными при исследовании отложений болот Мошгуба и Шлямино [Лаврова и др., 2005, 2007]. Они согласуются с датированием (1060 ± 60, ТА-1443) начала земледелия на территории Онежско-Ладожского перешейка, в районе пос. Эс-сойла [Экман, Журавлев, 1986].

Для ряда МТ, расположенных в пределах бассейна Онежского озера, была выполнена корреляция палеогеографических реконструкций (палеоклимата, уровня режима Онежского озера, относительного уровня малых палеоводоемов и динамики растительности) на единой шкале времени. Данные частично опубликованы [Филимонова, 2005, 2012; Filimonova, Lavrova, 2014; Филимонова, Лаврова, 2015 и др.] а для МТ «Кивач» представлены на рис. 2. Сопоставление и совместный их анализ позволили получить разноплановую и более достоверную картину изменений природной среды в позднеледниковье и голоцене на территории исследования.

Заключение

Выполненное обобщение палеогеографических данных, полученных для Онежского озера и его бассейна, показало, что территория исследования начала освобождаться от ледникового покрова ~ 13000–14000 л. н. Дегляциация котловины озера завершилась 11600 л. н., северо-западной части современного водосборного бассейна – в конце аллереда. Площадь, уровень и очертания берегов образовавшегося Онежского приледникового озера неоднократно менялись. По мере снижения его уровня происходило увеличение площади суходолов, отделение и обособление малых и средних палеоводоемов

в имеющихся депрессиях. Этот процесс начался в среднем дриасе и продолжался еще в атлантическое время. Вне акватории приледникового озера, но в пределах Ю и ЮВ части его водосборного бассейна озерообразование задерживалось по отношению ко времени дегляциации из-за длительного сохранения массивов мертвого льда. В центральной и СЗ части бассейна оно происходило практически синхронно времени дегляциации. Формирование органических отложений в озерах зафиксировано с начала пребореала. Отложение торфов в неглубоких депрессиях началось также в пребореале, в прибрежной части достаточно глубоких водоемов – в бореале. К концу суббореала большинство их заторфовалось.

Согласно реконструкциям динамики растительности, полученным со среднего дриаса до современности, расселение растений происходило по мере освобождения территории от ледника и приледниковых вод. Последние, а также погребенные льды задерживали формирование растительного покрова. Установлено, что состав и динамика растительности определялись климатическими факторами, а ее специфичность – геолого-геоморфологическими. Антропогенное влияние нашло отражение в спорово-пыльцевых диаграммах в виде уменьшения количества пыльцы древесных, особенно хвойных, пород а также увеличения количества и разнообразия пыльцы мелколиственных пород и трав, в том числе рудеральных и сеgetальных. Начало земледелия на Заонежском полуострове зафиксировано примерно со времени 1100 л. н.

Использование комплекса методов и привлечение литературных данных по геоморфологии и неотектонике территории, особенностям деградации последнего Валдайского оледенения и трансгрессивно-регрессивной деятельности Онежского озера позволило получить более полную и объективную картину изменений палеогеографической обстановки на территории исследования в позднеледниковье и голоцене.

Работа выполнена в рамках ГЗ (темы № 0221-2014-0035 и № 0222-214-0008.

Литература

Гричук В. П., Мальгина Е. А., Моносзон М. Х. Значение палеоботанических материалов для стратиграфии валдайских отложений // Последний ледниковый покров на северо-западе европейской части СССР / Ред. И. П. Герасимов. М.: Высшая школа, 1969. С. 57–105.

- Давыдова Н. Н.* Комплексы диатомей в донных отложениях Онежского озера // Палеоолиминология Онежского озера. Л.: Наука, 1976. С. 130–191.
- Девятова Э. И.* Природная среда и ее изменения в голоцене (побережье севера и центра Онежского озера). Петрозаводск: Карелия, 1986. 110 с.
- Демидов И. Н.* Четвертичные отложения // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 12–27.
- Демидов И. Н.* Деградация последнего оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 134–142.
- Демидов И. Н.* О выделении маркирующего горизонта в донных отложениях Онежского приледникового озера // ДАН. 2006а. Т. 407, № 2. С. 217–220.
- Демидов И. Н.* О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006б. С. 171–180.
- 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.
- Елина Г. А., Филимонова Л. В.* Этапы развития растительности и климата в восточном Заонежье в позднеледниковье и голоцене // Труды КарНЦ РАН, сер. Б. «Биология». 1999. Вып. 1. С. 21–27.
- Елина Г. А., Лукашов А. Д., Филимонова Л. В., Кузнецов О. Л.* Сукцессии палеорастительности позднеледниковья-голоцена на Заонежском полуострове и зависимости их от уровней Онежского озера // Ботан. журн. 1999. Т. 84, № 6. С. 32–52.
- Елина Г. А., Филимонова Л. В., Кузнецов О. Л., Лукашов А. Д., Стойкина Н. В., Арсланов Х. А., Тертичная Т. В.* Влияние палеогидрологических факторов на динамику растительности болот и аккумуляцию торфа // Ботан. журн. 1994. Т. 79, № 1. С. 53–69.
- Елина Г. А., Юрковская Т. К.* Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Ботан. журн. 1992. Т. 77, № 7. С. 120–124.
- Квасов Д. Д.* Происхождение котловины Онежского озера. Л.: Наука, 1976. С. 7–40.
- Короткина М. Я.* Ботанический анализ торфа // Методы исследования торфяных болот. Ч. 2. Лабораторные и камеральные работы / Ред. М. И. Нейштадт. Тр. ЦТОС. Т. VI. М., 1939. С. 5–60.
- Лаврова Н. Б.* Палинологическая характеристика донных отложений Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 219–225.
- Лаврова Н. Б.* Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005а. С. 143–148.
- Лаврова Н. Б.* Флора и растительность позднеледниковья Карелии (по данным спорово-пыльцевого анализа): Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2005б. 241 с.
- Лаврова Н. Б.* Некоторые особенности состава спорово-пыльцевых спектров позднеледниковых отложений Олонецкого плато // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 183–188.
- Лаврова Н. Б., Демидов И. Н.* Особенности зарождения малых озер юго-восточной окраины Фенноскандии в позднеледниковье и раннем голоцене // Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии: Материалы междунар. конф. Минск, 2003. С. 166–168.
- Лаврова Н. Б., Демидов И. Н., Спиридонов А. М., Герман К. Э., Мельников И. В.* Первые данные геолого-палинологических исследований о начале земледелия в районе Кижских шхер Онежского озера // 10 лет экологическому мониторингу музея-заповедника «Кижы». Итоги, проблемы, перспективы: Материалы науч.-практ. семинара. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 31–40.
- Лаврова Н. Б., Демидов И. Н., Спиридонов А. М., Герман К. Э., Мельников И. В.* К вопросу о начале земледелия на севере Онежского озера по палинологическим данным // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 10. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 194–206.
- Лаврова Н. Б., Субетто Д. А.* Палинологическая характеристика ленточных глин Онежского приледникового озера (новые данные) // Палеоолиминология Северной Евразии. Опыт, методология, современное состояние: Сб. тр. междунар. конф. 2016. С. 119–122.
- Лукашов А. Д.* Неотектоника Карелии. Л.: Наука, 1976. 109 с.
- Лукашов А. Д.* Геоморфологические условия // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 13–19.
- Лукашов А. Д., Демидов И. Н.* Условия формирования рельефа и четвертичных отложений Карелии в поздне- и послеледниковье как основа становления современной природной среды // Труды КарНЦ РАН, сер. Биогеография. 2001. Вып. 2. С. 30–47.
- Минкина Ц. И., Варлыгин П. Д.* Определение степени разложения торфа // Методы исследования торфяных болот. Ч. 1 / Ред. М. И. Нейштадт. Тр. ЦТОС. Т. V. М., 1939. С. 115–138.
- Онежское озеро.* Атлас. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 149 с.
- Филимонова Л. В.* Стандартные спорово-пыльцевые диаграммы позднеледниковья и голоцена средней Карелии // Палинология в России. Статьи российских палинологов к IX Междунар. палинологическому конгрессу. М., 1995. С. 86–103.
- Филимонова Л. В.* Динамика растительности среднетаежной подзоны Карелии в позднеледниковье и голоцене (палеоэкологические аспекты): Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2005. 200 с.
- Филимонова Л. В.* Отражение состава современной растительности в палиносpectрах средней тайги Карелии // Биоразнообразие, охрана и рациональное использование растительных ресурсов Севера: Материалы XI Перфильевских научных чтений,

посвящ. 125-летию со дня рождения И. А. Перфильева. Ч. 1. Архангельск: Архангельский гос. тех. ун-т, 2007. С. 278–282.

Филимонова Л. В. Использование палинологических данных при реконструкции палеогеографической обстановки и динамики болот // Палинология: стратиграфия и геоэкология: Сб. науч. трудов XII Всерос. палинологической конф. СПб.: ВНИГРИ, 2008. Т. 2. С. 258–264.

Филимонова Л. В. Динамика уровня режима, зарастания и заторфовывания палеоводоемов заповедника «Кивач» на фоне изменений природной среды за последние 11500 лет // Направления исследований в современном болотоведении России / Ред. Т. К. Юрковская. СПб.; Тула, 2010. С. 113–126.

Филимонова Л. В. Пространственно-временная динамика озерно-болотных экосистем заповедника «Кивач» на фоне изменения природной среды в позднеледниковье и голоцене // Труды Гос. природ. заповедника «Кивач». Вып. 5. Петрозаводск, 2011. С. 25–35.

Филимонова Л. В. Палеогеография заповедника «Кивач» в позднеледниковье-голоцене // Природные процессы и явления в уникальных условиях среднеатаежного заповедника: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кивач». Петрозаводск, 2012. С. 196–201.

Филимонова Л. В. Изменения климата, гидрологии и растительности в позднеледниковье-голоцене в бассейне Онежского озера // Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: Материалы Всерос. конф. «Марковские чтения 2015 года». М., 2015. С. 216–218.

Филимонова Л. В., Еловичева Я. К. Основные этапы развития растительности лесов и болот на территории заповедника «Кивач» // Болотные экосистемы европейского Севера. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1988. С. 94–109.

Филимонова Л. В., Климанов В. А. Изменение количественных показателей палеоклимата в среднеатаежной подзоне Карелии за последние 11000 лет // Труды КарНЦ РАН. 2005. Вып. 8. С. 112–120.

Филимонова Л. В., Климанов В. А. Изменения палеоклимата на территории заповедника «Кивач» за последние 11000 лет // Труды Гос. природ. заповедника «Кивач». Вып. 4. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 35–40.

Филимонова Л. В., Лаврова Н. Б. Палеогеография Заонежского полуострова в позднем плейстоцене и голоцене // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 4. С. 30–47. doi: 10.17076/bg22

Филимонова Л. В., Лаврова Н. Б. Палеогеографические исследования Онежского озера и его бассейна с использованием комплекса методов // Материалы V Междунар. конф. молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика)». Т. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 219–227.

Филимонова Л. В., Шелехова Т. С. Динамика уровня режима, зарастания и заторфовывания озера Руоколампи (заповедник «Кивач») в голоцене // Биоразнообразии, динамика и ресурсы болотных

экосистем Восточной Фенноскандии. Труды КарНЦ РАН. 2005. Вып. 8. С. 121–132.

Шелехова Т. С., Васья О. В., Демидов И. Н. Палеоэкологические условия развития северо-западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 149–157.

Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Развитие озер Вохтозерской ледораздельной возвышенности в позднеледниковье и голоцене // Геология и полезные ископаемые. Вып. 18. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 103–117.

Экман И. М., Журавлев А. П. О древнейшем земледелии в Карелии по данным хроно- и биостратиграфических исследований // Геология докембрия центральной и южной Карелии: опер.-информ. материалы. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1986. С. 51–54.

Filimonova L., Lavrova N. Paleogeography of Zaonezhye Peninsula // Biogeography, landscapes, ecosystems and species of Zaonezhye Peninsula, in Onega Lake, Russian Karelia / T. Lindholm, J. Jakovlev & A. Kravchenko (eds.) Report of the Finish environment institute 40, 2014. P. 57–72.

Filimonova L. V., Tarasov P. E., Harrison S. P. Dlinnoe Mire, Karelia, Russia // Lake Status Record from the Former Soviet Union and Mongolia: Documentation of the Second Version of the Database. Paleoclimatology Publication Series Report N 5. Boulder, Colorado, USA, 1996a. P. 50–52.

Filimonova L. V., Tarasov P. E., Pushenko M. Ya. Moshkarnoe Mire, Karelia, Russia // Lake Status Record from the Former Soviet Union and Mongolia: Documentation of the Second Version of the Database. Paleoclimatology Publication Series Report N 5. Boulder, Colorado, USA, 1996b. P. 57–58.

Kuosmanen N., Seppä H., Reitalu T., Alenius T., Bradshaw R. H. W., Clear J. L., Filimonova L., Kuznetsov O., Zaretskaya N. Long-term forest composition and drivers in taiga forest in NW Russia // Vegetation History and Archaeobotany. 2016. Vol. 25, iss. 3. P. 221–236. doi: 10.1007/s00334-015-0542-y

Kuosmanen N., Seppä H., Alenius T., Bradshaw R. H. W., Clear J. L., Filimonova L., Heikkilä M., Renssen H., Tallavaara M., Reitalu T. Importance of climate, forest fires and human population size in the Holocene boreal forest composition change in Northern Europe // Boreas. 2016. Vol. 45, iss. 4. P. 688–702. doi: 10.1111/bor.12183

Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkya End Moraine // Global and Planetary Changes. Vol. 31. Elsevier Science. 2001. P. 387–405. doi: 10.1016/S0921-8181(01)00131-X

Stokmarr J. Determination of spore concentration with in electronic particlecounter. Geological; Survey of Denmark. Kobenhavn. 1972. P. 87–89.

Wohlfarth B., Bennike O., Brunnberg L., Demidov I., Possnert G., Vyahirev S. AMS ¹⁴C measurements and macrofossil analyses of a varved sequence near Pudozh, eastern Karelia, NW Russia // Boreas. Oslo. 1999. Vol. 29. P. 575–586. doi: 10.1111/j.1502-3885.1999.tb00243.x

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, iss. 5. P. 732–746. doi: 10.1191/0959683604hl751rp

Поступила в редакцию 21.08.2017

References

Davydova N. N. Kompleksy diatomei v donnykh otlozheniyakh Onezhskogo ozera [Diatoms complexes in bottom sediments of Lake Onega]. *Paleolimnologiya Onezhskogo ozera* [Paleolimnology of Lake Onega]. Leningrad: Nauka, 1976. P. 130–191.

Devyatova E. I. Prirodnaya sreda i ee izmeneniya v golotsene (poberezh'e severa i tsentra Onezhskogo ozera) [Natural environment and its changes in the Holocene (shores of the northern and central parts of Lake Onega)]. Petrozavodsk: Kareliya, 1986. 110 p.

Demidov I. N. Chetvertichnye otlozheniya [The Quaternary deposits]. Raznoobrazie bioty Karelii: usloviya formirovaniya, soobshchestva, vidy [Diversity of Biota in Karelia: Formation Conditions, Communities, Forms]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2003. P. 12–27.

Demidov I. N. Degradatsiya poslednego oledeneniya v basseine Onezhskogo ozera [Degradation of the last glaciation in the Lake Onega basin]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2005. P. 134–142.

Demidov I. N. O vydelenii markiruyushchego gorizonta v donnykh otlozheniyakh Onezhskogo prilednikovogo ozera [Identification of marker horizon in bottom sediments of periglacial Lake Onega]. *DAN [Dokl. Earth Sciences]*. 2006a. Vol. 407, no. 2. P. 217–220.

Demidov I. N. O maksimal'noi stadii razvitiya Onezhskogo prilednikovogo ozera, izmeneniyakh ego urovnya i glyatsioizostaticheskom podnyatii poberezhii v pozdnelednikov'e [On the maximum stage in the evolution of periglacial Lake Onega, variations in its water level and glacioisostatic coastal uplifts in Late Glacial time]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006b. P. 171–180.

Demidov I. N., Lavrova N. B. Stroenie chetvertichnogo pokrova basseina r. Vodla (Vostochnaya Kareliya) i osobennosti razvitiya rastitel'nosti v pozdnei poslednikov'e [The Quaternary structure of the Vodla river basin (Eastern Karelia) and features of vegetation development in the Late Glacial and Post-Glacial period]. *Natsional'nyi park Vodlozerskii: prirodnoe raznoobrazie i kul'turnoe nasledie* [Vodlozersky National Park: Natural Diversity and Cultural Heritage]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2001. P. 49–60.

Ekman I. M., Zhuravlev A. P. O drevneishem zemledelii v Karelii po dannym khrono- i biostratigraficheskikh issledovaniy [On ancient agriculture in Karelia according to chrono- and biostratigraphic studies]. *Geologiya dokembriya tsentral'noi i yuzhnoi Karelii: Oper.-inform. materialy* [Precambrian Geology of the Central Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1986. P. 51–54.

Elina G. A., Filimonova L. V. Etapy razvitiya rastitel'nosti i klimata v vostochnom Zaonezh'e v pozdnelednikov'e i golotsene [Stages of vegetation and climate development in the Eastern Zaonezhie in the Late Glacial period and the Holocene]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 1999. Iss. 1. P. 21–27.

Elina G. A., Lukashov A. D., Filimonova L. V., Kuznetsov O. L. Suktsessii paleorastitel'nosti pozdnelednikov'ya-golotsena na Zaonezhskom poluostrove i zavisimosti ikh ot urovnei Onezhskogo ozera [Successions of the late-glacial palaeovegetation on Zaonezhsky Peninsula and their dependence on Lake Onega levels]. *Botan. zhurn. [Botan. Journal]*. 1999. Vol. 84, no. 6. P. 32–52.

Elina G. A., Filimonova L. V., Kuznetsov O. L., Lukashov A. D., Stoikina N. V., Arslanov Kh. A., Tertichnaya T. V. Vliyanie paleogidrologicheskikh faktorov na dinamiku rastitel'nosti bolot i akkumulyatsiyu torfa [Paleohydrological factors impact on the dynamics of mires vegetation and peat accumulation]. *Botan. zhurn. [Botan. Journal]*. 1994. Vol. 79, no. 1. P. 53–69.

Elina G. A., Yurkovskaya T. K. Metody opredeleniya paleogidrologicheskogo rezhima kak osnova ob'ektivizatsii prichin suksessii rastitel'nosti bolot [Methods for paleohydrological regime identification as the base of reasons objectification of mires vegetation succession]. *Botan. zhurn. [Botan. Journal]*. 1992. Vol. 77, no. 7. P. 120–124.

Filimonova L. V. Standartnye sporovo-pyl'tsevye diagrammy pozdnelednikov'ya i golotsena srednei Karelii [Standard spores and pollen diagrams of the Late Glacial period and the Holocene in the middle part of Karelia]. *Palinologiya v Rossii. Stat'i rossiiskikh palinologov k IX Mezhdunar. palinologicheskomu kongressu* [Palynology in Russia. Russian Palynologists' Papers for IX Int. Palynological Congress]. Moscow, 1995. P. 86–103.

Filimonova L. V. Dinamika rastitel'nosti srednetaezhnoi podzony Karelii v pozdnelednikov'e i golotsene (paleoekologicheskie aspekty) [Vegetation dynamics of the middle taiga sub-zone in Karelia in the Late Glacial period and the Holocene (paleoecological aspect)]: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk, 2005. 200 p.

Filimonova L. V. Otrazhenie sostava sovremennoi rastitel'nosti v palinospektrakh srednei taigi Karelii [Reflection of modern vegetation structure in palynospectra of the middle Karelian taiga]. *Bioraznoobrazie, okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie rastitel'nykh resursov Severa: Materialy XI Perfil'evskikh nauchnykh chtenii, posvyashch. 125-letiyu so dnya rozhdeniya I. A. Perfil'eva* [Biodiversity, Conservation, and Efficient Use of Vegetation Resources of the North: Proceed. of XI Perfil'yev Readings Dedicated to the 125th Anniv. of I. A. Perfil'yev].

Pt. 1. Arkhangel'sk: Arkhangel'skii gos. tekhn. un-t, 2007. P. 278–282.

Filimonova L. V. Ispol'zovanie palinologicheskikh dannykh pri rekonstruktsii paleogeograficheskoi obstanovki i dinamiki bolot [The use of palynological data for paleogeographical scenery and mires reconstruction]. Palinologiya: stratigrafiya i geoekologiya: Sb. nauch. trudov XII Vseros. palinologicheskoi konf. [Palynology: Stratigraphy and Geoecology: Proceed. of the XII All-Russ. Palynological Conf.]. St. Petersburg: VNIGRI, 2008. Vol. 2. P. 258–264.

Filimonova L. V. Dinamika urovennogo rezhima, zarastaniya i zatorfovyvaniya paleovodoemov zapovednika "Kivach" na fone izmenenii prirodnoi sredy za poslednie 11 500 let [Dynamics of the water level regime, weediness and paludification of paleo- water bodies of the Kivach Nature Reserve under environmental changes over the last 11 500 years]. Napravleniya issledovaniy v sovremennom bolotovedenii Rossii [Research Trends in the Modern Russian Telmathology]. Ed. T. K. Yurkovskaya. St. Petersburg; Tula, 2010. P. 113–126.

Filimonova L. V. Prostranstvenno-vremennaya dinamika ozerno-bolotnykh ekosistem zapovednika "Kivach" na fone izmeneniya prirodnoi sredy v pozdnelednikov'e i golotsene [Spatiotemporal dynamics of lake-mire ecosystems of the Kivach Nature Reserve under natural environment changes in the Late-glacial and Holocene]. *Trudy Gos. prirod. zapovednika "Kivach" [Proceed. of the Kivach St. Nature Reserve]*. Iss. 5. Petrozavodsk, 2011. P. 25–35.

Filimonova L. V. Paleogeografiya zapovednika "Kivach" v pozdnelednikov'e-golotsene [Paleogeography of the Kivach Nature Reserve in the Late-glacial and Holocene]. Prirodnye protsessy i yavleniya v unikal'nykh usloviyakh srednetaezhnogo zapovednika: Materialy nauch.-prakt. konf., posvyashch. 80-letiyu FGBU "Gosudarstvennyi prirodnyi zapovednik "Kivach"" [Natural Processes and Phenomena in the Unique Conditions of the Middle Taiga Nature Reserve: Proceed. of the Scientific and Pract. Conf. Dedicated to the 80th Anniv. of the Kivach St. Nature Reserve]. Petrozavodsk, 2012. P. 196–201.

Filimonova L. V. Izmeneniya klimata, gidrologii i rastitel'nosti v pozdnelednikov'e-golotsene v basseine Onezhskogo ozera [Changes of climate, hydrology, and vegetation in the Late-glacial and Holocene in Lake Onega basin]. Aktual'nye problemy paleogeografii i stratigrafii pleistotsena: Materialy Vseros. konf. "Markovskie chteniya 2015 goda" [Topical Problems of Paleogeography and Stratigraphy of the Pleistocene: Proceed. of the All-Russ. Conf. *Markov Readings 2015*]. Moscow, 2015. P. 216–218.

Filimonova L. V., Elovicheva Ya. K. Osnovnye etapy razvitiya rastitel'nosti lesov i bolot na territorii zapovednika "Kivach" [Main stages of the development of forest and mires vegetation on the territory of the Kivach Nature Reserve]. Bolotnye ekosistemy evropeiskogo Severa [Mire Ecosystems of the European North]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1988. P. 94–109.

Filimonova L. V., Klimanov V. A. Izmenenie kolichestvennykh pokazatelei paleoklimata v srednetaezhnoi podzone Karelii za poslednie 11 000 let [Changes of quantitative data of the paleoclimate in the middle taiga sub-zone of Karelia over the last 11 000 years]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2005. Iss. 8. P. 112–120.

Filimonova L. V., Klimanov V. A. Izmeneniya paleoklimata na territorii zapovednika "Kivach" za poslednie 11 000 let [Changes of paleoclimate on the territory of the Kivach Nature Reserve over the last 11 000 years]. *Trudy Gos. prirod. zapovednika "Kivach" [Proceed. of the Kivach State Nature Res.]*. Вып. 4. Petrozavodsk: PetrGU, 2008. P. 35–40.

Filimonova L. V., Lavrova N. B. Paleogeografiya Zaonezhskogo poluostrova v pozdnem pleystotsene i golotsene [Paleogeography of the Zaonezhsky Peninsula in the Late Pleistocene and Holocene]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2015. No. 4. P. 30–47. doi: 10.17076/bg22

Filimonova L. V., Lavrova N. B. Paleogeograficheskie issledovaniya Onezhskogo ozera i ego basseina s ispol'zovaniem kompleksa metodov [Paleogeographical study of Lake Onega and its basin with the use of a complex of methods]. Materialy V Mezhdunar. konf. molodykh uchennykh "Vodnye resursy: izucheniye i upravleniye (limnologicheskaya shkola-praktika)" [Water Resources: Research and Management (Limnological School and Workshop)]. Proceed. of V Int. Conf. of Young Scientists]. Vol. 1. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2016. P. 219–227.

Filimonova L. V., Shelekhova T. S. Dinamika urovennogo rezhima, zarastaniya i zatorfovyvaniya ozera Ruokolampi (zapovednik "Kivach") v golotsene. Biiraznoobrazie, dinamika i resursy bolotnykh ekosistem Vostochnoi Fennoskandii [Dynamics of level regime, overgrowing, and dystrophy of Lake Ruokolampi (Kivach Nature Reserve) in the Holocene. Biodiversity, dynamics, and resources of mire ecosystems in the Eastern Fennoscandia]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2005. Iss. 8. P. 121–132.

Grichuk V. P., Mal'gina E. A., Monoszon M. Kh. Znacheniye paleobotanicheskikh materialov dlya stratigrafii valdaiskikh otlozhenii [The importance of paleobotanical materials for the Valdai deposits stratigraphy]. Poslednii lednikovyi pokrov na severo-zapade evropeiskoi chasti SSSR [The Last Ice Sheet in the North-West of the European Part of the USSR]. Ed. I. P. Gerasimov. Moscow: Vysshaya shkola, 1969. P. 57–105.

Kvasov D. D. Proiskhozhdeniye kotloviny Onezhskogo ozera [The origin of Lake Onega basin]. Leningrad: Nauka, 1976. P. 7–40.

Korotkina M. Ya. Botanicheskii analiz torfa [Botanical analysis of peat]. Metody issledovaniya torfyanykh bolot. Ch. 2. Laboratornye i kameral'nye raboty [Research Methods of Peat Mires. Part 2. Laboratory and In-office Studies]. Ed. M. I. Neishtadt. Tr. TsTOS [Trans. CPES]. Vol. VI. Moscow, 1939. P. 5–60.

Lavrova N. B. Palinologicheskaya kharakteristika donnykh otlozhenii Onezhskogo ozera [Palynological characteristics of Lake Onega bottom sediments]. Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2004. P. 219–225.

Lavrova N. B. Razvitie rastitel'nosti basseina Onezhskogo ozera v khode degradatsii poslednego oledeneniya [Vegetation development in Lake Onega basin under the degradation of the last glaciation]. Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2005a. 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 Glacial period in Karelia (according to spores and pollen analysis data)]: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk, 2005b. 241 p.

Lavrova N. B. Nekotorye osobennosti sostava sporovo-pyl'tsevyykh spektrov pozdnelednikovyykh otlozhenii Olonetskogo plato [Some features of spore-pollen spectra of the late glaciation deposits on the Olonets Plateau]. Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 183–188.

Lavrova N. B., Demidov I. N. Osobennosti zarozhdeniya malykh ozer yugo-vostochnoi okrainy Fennoskandii v pozdnelednikov'e i rannem golotsene [Features of small lakes origin in the south-eastern part of Fennoscandia during the Late Glacial period and Early Holocene]. Teoreticheskie i prikladnye problemy sovremennoi limnologii: Materialy mezhdunar. konf. [Theoretical and Practical Issues of Modern Limnology: Proceed. of the Int. Conf.]. Minsk, 2003. P. 166–168.

Lavrova N. B., Demidov I. N., Spiridonov A. M., German K. E., Mel'nikov I. V. Pervye dannye geologopalinologicheskikh issledovaniy o nachale zemledeliya v raione Kizhskikh shkher Onezhskogo ozera [First data on the geological and palynological studies of the origin of agriculture in Kizhi skerries of Lake Onega]. 10 let ekologicheskomu monitoringu muzeya-zapovednika "Kizhi". Itogi, problemy, perspektivy: Materialy nauch.-prakt. seminarov [10th Anniv. of Ecological Monitoring of the Kizhi Museum. Results, Problems, and Prospects: Proceed. of the Scientific and Practical Seminar]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2005. P. 31–40.

Lavrova N. B., Demidov I. N., Spiridonov A. M., German K. E., Mel'nikov I. V. K voprosu o nachale zemledeliya na severe Onezhskogo ozera po palinologicheskim dannym [On the origin of agriculture in the northern part of Lake Onega: palynological data]. Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 10. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 194–206.

Lavrova N. B., Subetto D. A. Palinologicheskaya kharakteristika lentochnykh glin Onezhskogo prilednikovogo ozera (novye dannye) [Palynological description of banded clay of periglacial Lake Onega (new data)]. Paleolimnologiya Severnoi Evrazii. Opyt, metodologiya, sovremennoe sostoyanie: Trudy mezhdunar. konf. [Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current State: Proceed. of the Int. Conf.]. 2016. P. 119–122.

Lukashov A. D. Neotektonika Karelii [Neotectonics of Karelia]. Leningrad: Nauka, 1976. 109 p.

Lukashov A. D. Geomorfologicheskie usloviya [Geomorphological conditions]. Raznoobrazie bioty Karelii: usloviya formirovaniya, soobshchestva, vidy [Diversity of Biota in Karelia: Formation Conditions, Communities, Forms]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2003. P. 13–19.

Lukashov A. D., Demidov I. N. Usloviya formirovaniya rel'efa i chetvertichnykh otlozhenii Karelii v pozdnelednikov'e kak osnova stanovleniya sovremennoi prirodnoi sredy [Conditions of landscape formation and the Quaternary deposits of Karelia in the Late Glacial and Post-Glacial period as the base of modern natural

environment formation]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2001. Iss. 2. P. 30–47.

Minkina Ts. I., Varlygin P. D. Opredelenie stepeni razlozheniya torfa [Identification of peat decomposition degree]. *Metody issledovaniya torfyanykh bolot [Research Methods of Peat Mires]*. Pt. 1. Ed. M. I. Neishtadt. Tr. TsTOS [Trans. CPES]. Vol. V. Moscow, 1939. P. 115–138.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onego. Atlas]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2010. 149 p.

Shelekhova T. S., Vas'ko O. V., Demidov I. N. Paleoekologicheskie usloviya razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v pozdnelednikov'e i golotsene [Paleoecological conditions of the development of the north-eastern Onega region in the Late Holocene]. Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2005. P. 149–157.

Shelekhova T. S., Lavrova N. B. Razvitie ozer Vokhtozerskoi ledorazdel'noi vozvysheynosti v pozdnelednikov'e i golotsene [Development of the lakes of the Vokhtozero ice-divide upland in the Late Holocene]. Geologiya i poleznye iskopaemye [Geology and Mineral Resources]. Iss. 18. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2016. P. 103–117.

Filimonova L., Lavrova N. Paleogeography of Zaonezhye Peninsula. Biogeography, landscapes, ecosystems and species of Zaonezhye Peninsula, in Onega Lake, Russian Karelia. T. Lindholm, J. Jakovlev & A. Kravchenko (eds.). Report of the Finish environment institute 40, 2014. P. 57–72.

Filimonova L. V., Tarasov P. E., Harrison S. P. Dlinnoe Mire, Karelia, Russia. Lake Status Record from the Former Soviet Union and Mongolia: Documentation of the Second Version of the Database. Paleoclimatology Publication Series Report N 5. Boulder, Colorado, USA, 1996a. P. 50–52.

Filimonova L. V., Tarasov P. E., Pushenko M. Ya. Moshkarnoe Mire, Karelia, Russia. Lake Status Record from the Former Soviet Union and Mongolia: Documentation of the Second Version of the Database. Paleoclimatology Publication Series Report N 5. Boulder, Colorado, USA, 1996b. P. 57–58.

Kuosmanen N., Seppä H., Reitalu T., Alenius T., Bradshaw R. H. W., Clear J. L., Filimonova L., Kuznetsov O., Zaretskaya N. Long-term forest composition and drivers in taiga forest in NW Russia. *Vegetation History and Archaeobotany*. 2016. Vol. 25, iss. 3. P. 221–236. doi: 10.1007/s00334-015-0542-y

Kuosmanen N., Seppä H., Alenius T., Bradshaw R. H. W., Clear J. L., Filimonova L., Heikkilä M., Renssen H., Tallavaara M., Reitalu T. Importance of climate, forest fires and human population size in the Holocene boreal forest composition change in Northern Europe. *Boreas*. 2016. Vol. 45, iss. 4. P. 688–702. doi: 10.1111/bor.12183

Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkya End Moraine. *Global and Planetary Changes*. Vol. 31. *Elsevier Science*. 2001. P. 387–405. doi: 10.1016/S0921-8181(01)00131-X

Stokmarr J. Determination of spore concentration with in electronic particlecounter. Geological; Survey of Denmark. Kobenhavn. 1972. P. 87–89.

Wohlfarth B., Bennike O., Brunnberg L., Demidov I., Possnert G., Vyahirev S. AMS ¹⁴C measurements and macrofossil analyses of a varved sequence near Pudozh, eastern Karelia, NW Russia. *Boreas*. Oslo. 1999. Vol. 29. P. 575–586. doi: 10.1111/j.1502-3885.1999.tb00243.x

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, iss. 5. P. 732–746. doi: 10.1191/0959683604hl751rp

Received August 21, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филимонова Людмила Владимировна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: filimonovaluda@mail.ru
тел.: 89214513626, 89535444890

Лаврова Надежда Борисовна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: lavrova@krc.karelia.ru
тел.: 89214545451

CONTRIBUTORS:

Filimonova, Lyudmila

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: filimonovaluda@mail.ru
tel.: +79214513626, +79535444890

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.: +79214545451

ХРОНИКА

I МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ» И ШКОЛА-ПРАКТИКА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г.)

11–15 сентября 2017 г. в Петрозаводске, Республика Карелия, по инициативе Института водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук была проведена I Международная конференция «Озера Евразии: проблемы и пути их решения».

Важной задачей конференции являлась консолидация ученых стран Евразии и стран – членов БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай, ЮАР) для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, обоснование возможного перераспределения водных ресурсов, рационального использования и охраны озер Евразии. Развитие проекта евразийской интеграции не может осуществляться без особого внимания к вопросам окружающей среды, и особенно ее водных объектов. Для гармоничного процесса международного развития Евразии актуальным является изучение фундаментальных проблем и решение практических вопросов в тесном сотрудничестве ученых многих стран.

В работе конференции приняли участие 270 участников, из них – 3 члена Российской академии наук, 41 доктор и 75 кандидатов наук, 4 аспиранта и 184 студента, представляющих свыше 65 отечественных и зарубежных учреждений высшего образования, научных институтов и других организаций, 18 городов России и 10 иностранных государств. Издан сборник трудов объемом 645 стр., в который вошли 111 статей. Материалы конференции

представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН (http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/laev2017/ozera_evrazii_ivps_2017_small.pdf).

Участников конференции приветствовали представители Отделения наук о Земле Российской академии наук, Петрозаводского госуниверситета, Министерства природных ресурсов и экологии Республики Карелия, Управления Росприроднадзора по Республике Карелия, Отдела водных ресурсов по Республике Карелия, Невско-Ладожского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов, Законодательного Собрания Республики Карелия, РАН и руководство КарНЦ РАН.

Работа конференции проводилась в рамках пленарных заседаний и четырех секций: «Гидрология и гидрофизика», «Гидробиологические исследования», «Гидрохимические исследования крупных внутренних водоемов» и «Палеолимнология».

На конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» в г. Петрозаводске в тесном сотрудничестве ученых обсуждались следующие основные проблемы:

- Современное состояние и изменения экосистем озер Евразии.
- Трансграничные озерно-речные системы. Проблемы и пути совместного использования.
- Пути решения проблем прогноза внутриводных изменений гидрологического режима и экосистем.

- Перспективные методы моделирования экосистем для поддержки принятия управленческих решений.
- Совершенствование правовых основ для сохранения ресурсов озер.
- Зимняя лимнология.
- Вселенцы и их роль в изменении экосистем озер.
- Инновационные методы изучения влияния наночастиц. Формирование химического состава воды озер и нормирование допустимого антропогенного воздействия на них.
- Актуальные проблемы палеолимнологии.
- Проблемы поступления метана из озер.
- Влияние климатических и антропогенных изменений.

Представлены разработки моделей экосистем и возможности использования их для управления озерными экосистемами.

В пленарных докладах, которые состоялись 11, 13 и 14 сентября, были заслушаны сообщения о проблемах оценки состояния и прогноза изменения разнообразных озер Евразии: Байкала, Телецкого, Каспия, Ладожского, Онежского, Белого, Кубенского, Воже, озер Западно-Сибирской равнины, Германии, Арктики, Центральной Азии, а также трансграничных озер (Ханка, Псковско-Чудское, Или-Балхашской системы, Арал и др.). Обсуждались проблемы медленного восстановления трофического статуса, экосистем озер после резкого уменьшения биогенной нагрузки в 90-х годах

XX века. Общей проблемой многих озер – источников водоснабжения, рекреации, биоресурсов является отсутствие или плохая работа комплексов очистных сооружений (КОС), значительное влияние загрязнений прибрежной зоны озера при развитии массового туризма, не обеспеченного опережающим развитием КОС. Показано, что основными проблемами для трансграничных озер являются зачастую несогласованные действия стран, расположенных на берегах и водосборах озер (Байкал, Ханка, Арал, Каспий, Псковско-Чудское). Для оз. Байкал озабоченность вызывает возможное строительство ГЭС в Монголии, что может привести к уменьшению стока р. Селенги и еще более обострит ситуацию с состоянием экосистем озера. Потепление климата последние 30 лет приводит к заметному изменению гидрологического режима, возрастанию концентрации метана многих озер Евразии. Обмеление Арала из-за антропогенного влияния привело к катастрофическим изменениям экосистем, в последние годы предприняты попытки спасти северную часть, для чего были построены плотины, а в дальнейшем планируется построить еще одну, регулирующую сток из Центрального Арала, что позволило бы сделать его рыбопромысловым водоемом. Несмотря на определенные успехи комплексных исследований подо льдом озер Евразии (на озерах Байкал, Онежском, Вендюрском, ряде озер Германии), отмечалась необходимость проведения



дополнительных комплексных исследований, для того чтобы корректно описать, моделировать, прогнозировать состояние озер при разном комплексе условий. Показана опасность влияния потепления климата на гидрологический режим водоемов, в результате которого ряд озер Евразии могут перейти из димиктического в мономиктический режим; изменение глубины озер Арктики и Субарктики при таянии вечной мерзлоты может привести к увеличению поступления метана; отмечается осолонение озер аридных зон Евразии.

В рамках работы конференции ИВПС КарНЦ РАН и ПетрГУ на базе Петрозаводского государственного университета проведена школа-практика молодых исследователей, на которой с лекциями выступили известные ученые: чл.-корр. РАН Э. В. Ивантер, д. ф.-м. н., проф. С. Р. Богданов, д. г.-м. н., проф. Н. В. Шаров и к. г. н. Л. В. Десинов. А на специальной научной секции молодые ученые, аспиранты и студенты выступили с научными презентациями и представили стендовые доклады. Для студентов были организованы научные экскурсии, продемонстрированы научно-популярные фильмы о проблемах Ладоги, Байкала и Арала. Сотрудники библиотек ПетрГУ и КарНЦ РАН организовали выставки книг о лимнологии и водных ресурсах.

На конференции была реализована идея создания научной платформы для обсуждения наиболее важных фундаментальных и практических проблем многочисленных водных

объектов Евразии с учетом их природного разнообразия, трансграничного значения, различных подходов к использованию, включая возможное перераспределение водных ресурсов, строительство гидротехнических сооружений в условиях изменения климата.

В докладах отмечалось, что для озера Байкал, а также ряда других крупных озер Евразии важно развитие системного эколого-социально-экономического подхода к исследованию водоема и водосбора; наблюдается разрозненность усилий разных научных организаций из-за недостаточной координации работ; отмечалось несовершенство существующей системы мониторинга; отсутствие интегрированных систем управления водопользованием, основанных на данных и знаниях и соответствующих математических моделях для создания систем поддержки принятия управленческих решений. Для решения этих проблем требуется объединение средств и возможностей организаций Евразии. Необходимо использовать возможности международных организаций БРИКС, ЕАЭС, международных и российских научных фондов.

На заседании круглого стола, посвященного проблемам законодательства по охране ресурсов озер, рассматривался опыт реализации Федерального закона «Об охране озера Байкал»: история и трудности реализации. Подчеркивалось, что закон пока не стал комплексным природоохранным механизмом, окончательно



© фото Игоря Георгиевского

снимающим угрозу экологической системе озера. Для решения проблемы озера Байкал требуется объединение средств и возможностей не только научных учреждений, непосредственно занимающихся изучением озера и водосбора, но и органов государственного управления и контроля России и других стран. На конференции отмечалась необходимость гармонизации ряда положений Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды и отдельные законодательные акты Российской Федерации» и Водного кодекса РФ.

Представленные в докладах материалы и итоги состоявшегося обсуждения позволили сформулировать ряд предложений и рекомендаций. На конференции отмечалось, что в Евразии уже осуществляется и планируется ряд крупных проектов по перераспределению водных ресурсов озерно-речных систем, что может затронуть интересы многих стран континента. Необходимо отметить, что оптимальные решения рассматриваемых научных проблем, связанных с изучением, использованием и охраной водных объектов, находятся в зависимости от экономической и политической стабильности как внутри каждой отдельной страны, так и Евразии в целом, от гармонизации подходов к охране и рациональному использованию ресурсов, оценке параметров качества вод.

Предложено выработать общие для стран Евразии нормативные документы, регламентирующие на законодательном уровне критерии оценки экологического состояния трансграничных водных объектов. Требуется обратить внимание на достоверность результатов количественного анализа определяемых компонентов (концентраций) химических параметров, полученных различными аналитическими методами. На международном уровне требуется консолидация усилий по гармонизации подходов к оценке разнообразных параметров вод, в особенности биогенных и загрязняющих веществ. Отмечалась малая доступность данных в РФ, получаемых Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, необходимость существенного расширения сети гидрологических наблюдений.

В области образования отмечалась необходимость рекомендовать соответствующим профильным высшим учебным заведениям разработать и ввести в учебные планы подготовки специалистов специализированную программу

«лимнология», повысить качество образования в области гидрологии, экологии, лимнологии.

Проблемы рационального использования и охраны ресурсов озер Евразии связаны с незавершенностью модернизации законодательной и нормативно-методической базы, несовершенством управления ресурсами, существующей системы мониторинга, их адаптации к современному уровню и перспективам экономического развития ряда стран, требованиям обеспечения экологической безопасности.

Участники конференции высказали общее мнение о необходимости издания печатного журнала «Озера Евразии» и его электронной версии.

Актуальным на сегодняшний момент является создание ассоциации исследователей озер Евразии с привлечением лимнологов России, стран – участников БРИКС, а также Беларуси, Казахстана, Киргизстана, Монголии, Армении, Ирана и других стран Евразии.

По предложению участников конференции Оргкомитет направил резолюцию в ведущие научные организации стран Евразии с предложением организовывать конференцию «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» с периодичностью раз в 2 года и следующую провести в одной из стран БРИКС, ЕАЭС при поддержке РАН, ФАНО России и других организаций и фондов.

Организация конференции и издание материалов конференции осуществлены Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН в Год экологии в России. Конференция проведена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (ФАНО), ОНЗ РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-20427), Российского научного фонда (грант № 14-17-00740-П «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях») и фонда «ELEMО», Швейцария (проект «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений»).

Мы благодарим фирму «Карелика» за помощь в организации конференции, фирму «Славмо» за предоставление участникам замечательной карельской воды «Карельская жемчужина» и работников гостиничного комплекса «Онега-Палас» за отличное обслуживание.

Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд

VI ВСЕРОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВО ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ И МОРСКИХ ВОДАХ» (Барнаул, 28–29 сентября 2017 г.)

28–29 сентября 2017 года в г. Барнауле, Алтайский край, проходил очередной, VI симпозиум «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах». В соответствии с рекомендацией предыдущего, V симпозиума (состоялся в 2012 г. в Петрозаводске на базе Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН)) он был организован на базе Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН). Совместно с симпозиумом проводилась III Всероссийская научная конференция с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», приуроченная к 30-летию ИВЭП СО РАН и Году экологии в России.

С приветствием к участникам обратились сопредседатели оргкомитета симпозиума А. В. Пузанов (ИВЭП СО РАН) и Д. А. Субетто (ИВПС КарНЦ РАН), а также В. Н. Попрядухин (и. о. министра природных ресурсов и экологии Алтайского края, Барнаул), академик РАН В. А. Румянцев (Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург), А. И. Сысо (Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск), член-корреспондент РАН Н. Н. Филатов (ИВПС КарНЦ РАН), Л. М. Корытный (Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск) и Ю. И. Винокуров (председатель Алтайского краевого отделения Русского географического общества, Барнаул). В своих выступлениях они отметили важность изучения процессов поступления и трансформации органических



веществ и биогенных элементов для оценки и прогнозирования экологического состояния внутренних водоемов и морских вод.

На симпозиуме продемонстрировано большое разнообразие тем и проблем, которые решает данное направление гидрохимии. В работе мероприятия приняли очное участие более 50 специалистов (12 докторов и 18 кандидатов наук) из 12 учреждений России. От общего числа участников почти половину составили молодые ученые. Всего на четырех заседаниях симпозиума представлено 27 устных докладов из институтов РАН, университетов и других учреждений России. Около 20 человек приняли личное участие в конференции без представления доклада. Кроме того, 30 докладов были представлены в форме заочного участия и в виде постеров. Тематика симпозиума включала следующие направления: источники поступления, содержание и распределение органического вещества (ОВ) и биогенных элементов (БЭ) в объектах гидросферы; трансформация и круговорот органических веществ и биогенных элементов в водных объектах; продукционно-деструкционные процессы в природных водах; математическое моделирование и методы анализа ОВ и БЭ в природных и загрязненных водах.

На объединенном пленарном заседании симпозиума и конференции было заслушано и обсуждено четыре наиболее актуальных доклада, из них симпозиум представляли два доклада – Д. А. Субетто «Палеолимнологические и палеоэкологические исследования в Северной Евразии» и Н. Н. Филатова «Комплексные исследования озер Евразии». В своих секционных докладах участники симпозиума отметили, что в условиях роста антропогенной нагрузки на водные объекты изучение процессов эвтрофикации имеет важное значение как в научном отношении, так и в водном хозяйстве страны. Особое внимание было уделено крупным озерам: Байкалу, Ладожскому, Онежскому и Телецкому, а также наиболее уязвимым средним и малым водным объектам. Приоритетное значение имеют вопросы укрепления базы натуральных и лабораторных исследований, развития системы наблюдений на водных объектах.

В своем решении симпозиум отмечает высокий уровень организации и проведения заседаний, интересную и всестороннюю тематику, высокий научный уровень докладов, значительное представительство молодежи. Участники констатировали, что такие формы научного общения весьма полезны и способствуют развитию

отечественной науки, и считают целесообразным дальнейшее проведение серии симпозиумов «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах». Также симпозиум рекомендует шире использовать математическое моделирование и математические методы в гидрохимии и гидробиологии, развивать деятельность по систематическому и комплексному исследованию водных объектов, расширять исследования в области охраны и восстановления водных объектов. Важное значение имеют работы в области регулирования антропогенных нагрузок и прогнозирования состояния водных объектов, в том числе по изучению состава донных отложений, физико-химических и биохимических процессов в них, а также оценка их роли в озерных экосистемах. Является актуальной разработка научных основ мониторинга водных объектов. Была отмечена необходимость подготовки в профильных вузах России специалистов по гидрохимии, а также организации защиты диссертаций по химическим наукам на базе советов по специальности «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

На наш взгляд, удачно был выбран формат проведения пленарной секции, когда на наиболее интересные доклады было предусмотрено по 30 минут, что позволило их развернуто представить и обсудить. Все секционные доклады шли последовательно, и участники симпозиума могли послушать все выступления или поучаствовать в работе секций по близкой тематике параллельно проходящей конференции. Весьма обширна была география российских участников симпозиума: от Санкт-Петербурга до Владивостока. Опубликованный сборник трудов симпозиума в электронном виде находится в свободном доступе на сайте ИВЭП СО РАН (http://www.iwep.ru/2017_IVEP_Simposium.pdf). К недостаткам проведения можно отнести отсутствие личного участия в симпозиуме иностранных специалистов – исследователи из Литвы, Казахстана, Кыргызстана и Франции представили свои доклады только в изданном сборнике трудов.

Следующий симпозиум по этой тематике рекомендовано провести в 2022 г. во Владивостоке на базе Тихоокеанского института географии и Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН.

*А. В. Пузанов, Д. А. Субетто,
Д. М. Безматерных, Д. Н. Трошкин, А. А. Цхай*

УТРАТЫ

ПАМЯТИ ПЕТРА АЛЕКСАНДРОВИЧА ЛОЗОВИКА (1951–2017)

6 сентября не стало доктора химических наук, заслуженного деятеля науки Республики Карелия Петра Александровича Лозовика. Уже будучи тяжело больным человеком, он не переставал трудиться в возглавляемой им лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. В последние месяцы своей жизни Петр Александрович обходился без сна и без еды, но так и не смог жить без своей любимой работы.

П. А. Лозовик родился 22 октября 1951 года в дер. Нивиняны Виленского района Белорусской ССР. С 1959 по 1963 г. обучался в местной школе, а в 1964 году переехал в Петрозаводск, где продолжил обучение в школе № 71 до 1969 г. В этом же году поступил на химический факультет Ленинградского государственного университета – одного из ведущих вузов страны. П. А. Лозовик получил классическое университетское образование, а специализацию проходил в лаборатории молекулярной спектроскопии под руководством доцента О. В. Свездловой – известного специалиста, занимавшегося применением инфракрасной спектроскопии в аналитической и органической химии.

В 1974 году после окончания ЛГУ Петр Александрович был принят на работу инженером в лабораторию гидрохимии Отдела водных проблем (на тот момент) Карельского филиала Академии наук СССР. В этой лаборатории он и проработал всю свою жизнь. В 1976 году П. А. Лозовик поступил в аспирантуру при Гидрохимическом институте в г. Ростов-на-Дону, которую успешно окончил, защитив в 1980 г. диссертацию на тему «Процессы



превращения фенольных соединений в природной воде» на соискание ученой степени кандидата химических наук. Его руководителем был д. х. н. В. Т. Каплин, известный ученый-гидрохимик. После окончания аспирантуры Петр Александрович переведен на должность младшего научного сотрудника. С 1983 г. П. А. Лозовик был ученым секретарем ОВП, а в 1986 году избран на должность заведующего лабораторией гидрохимии, в которой он проработал более 30 лет. Его огромной работоспособности поражаются все, кто его знал и кто с ним работал.

В 2006 году П. А. Лозовик защитил докторскую диссертацию по химическим наукам на тему «Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию».

Защита проходила в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (г. Москва).

Область научных исследований П. А. Лозовика очень обширна – это гидрохимия поверхностных вод гумидной зоны (региональная гидрохимия, экологическая химия, процессы формирования химического состава воды, нормирование допустимого антропогенного воздействия), а также аналитическая химия (методы анализа природных и загрязненных вод). В области гидрохимии им выполнен большой объем фундаментальных и прикладных исследований. В частности, разработана геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны, которая позволяет оценить качество воды по ограниченному набору параметров. В области региональной гидрохимии под его руководством и при непосредственном участии проведен большой объем работы по химическому мониторингу водных объектов Карелии и подготовлены данные по гидрохимии водных объектов в справочнике «Озера Карелии».

Наиболее существенный вклад им сделан в исследование процессов формирования химического состава поверхностных вод. Петр Александрович активно изучал кинетические и термодинамические закономерности трансформации лабильных веществ в природных водах; им выведено фундаментальное уравнение, позволяющее оценить скорости этих превращений. Были разработаны новые модели закисления вод на основе буферной емкости и продукционно-деструкционных процессов на основе кинетики биологического потребления кислорода. Он предложил новые критерии оценки загрязнения вод и нормирования допустимого антропогенного воздействия, учитывающие региональную специфику вод. Нормирование допустимой антропогенной нагрузки при эвтрофировании водных объектов осуществляется по их ассимиляционной способности и принципу сохранения геохимического класса вод, а при загрязнении – по региональному индексу загрязнения воды. В области экологической химии П. А. Лозовик проводил исследования физико-химических процессов (седиментации, диффузии, окислительно-восстановительных условий, агрегативной устойчивости коллоидных частиц). Им выявлена роль атмосферных осадков и водосборной территории в процессе формирования химического состава поверхностных вод Карелии. Новые методические подходы П. А. Лозовика представляют большой практический интерес. Им разработаны новые методики определения химических веществ

в воде (фенолов, хлоридов, сульфатов, лигносульфонатов, элементного состава органических веществ и др.). Петр Александрович активно внедрял в лаборатории современные аналитические методы исследования – жидкостную хроматографию, инфракрасную и электронную спектроскопию, атомно-абсорбционную спектрометрию, масс-спектрометрию и др. Лаборатория приобрела уникальное отечественное и зарубежное оборудование и стала соответствовать общепринятым стандартам проведения аналитических работ, что позволило успешно пройти сложную процедуру государственной аккредитации. Сотрудники лаборатории ежегодно принимают участие в международном проекте «ICP Waters» (Норвегия), где получают хорошую сходимость результатов анализа. По инициативе П. А. Лозовика в 2015 году была проведена работа по межлабораторному сравнению результатов количественного химического анализа природных вод на биогенные элементы и органическому веществу, в которой приняли участие аналитические лаборатории из различных регионов России.

В качестве важнейших прикладных исследований следует выделить обоснование попусков воды из хвостохранилища Костомукшского ГОКа, организацию водоснабжения из поверхностных источников городов Сортавала, Петрозаводск, Суоярви, Кондопога, поселков Муезерский, Пряжа и др., а также оценку допустимых объемов выращивания товарной форели на внутренних водоемах. Кроме того, под руководством П. А. Лозовика проведены исследования по использованию карельских шунгитов для очистки воды и разработан способ консервации марциальных вод.

В общей сложности П. А. Лозовик имеет свыше 150 научных публикаций, он соавтор шести монографий, двух справочников и Атласа Онежского озера (2010 г.). Только за последние 10 лет им опубликовано свыше 70 научных работ, в том числе 23 статьи в журналах перечня ВАК.

Петр Александрович так и не увидел свой последний многолетний фундаментальный труд – научно-методическое пособие «Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике», в это самое время издание печатается в Санкт-Петербурге. Остались многочисленные рукописи – неоконченные научные статьи для ведущих отечественных и зарубежных журналов, монография «Справочник по гидрохимии», учебник по гидрохимии. Работа над ними продолжается сотрудниками лаборатории, но уже без своего руководителя.

П. А. Лозовик осуществлял руководство научно-исследовательскими проектами: программами фундаментальных исследований ОНЗ РАН (2004–2015 гг.), тремя грантами РФФИ, бюджетными и хоздоговорными темами института (только с 2006 г. 25 тем). Он активно привлекал в институт внебюджетные источники финансирования.

П. А. Лозовик был членом химического общества им. Д. И. Менделеева, членом Президиума КарНЦ РАН, членом Ученого совета ИВПС КарНЦ РАН, членом редколлегий серий «Экологические исследования» и «Лимнология» журнала «Труды Карельского научного центра РАН». Свою научную работу П. А. Лозовик совмещал с педагогической деятельностью. С 1997 по 2012 г. он был заведующим и профессором кафедры химии КГПА, читал курс лекций по физической химии, коллоидной химии, химии окружающей среды, спецкурс по спектрофотометрии. Осуществлял руководство дипломными проектами (их подготовлено свыше 30). П. А. Лозовик осуществлял подготовку аспирантов по специальности «гидрология суши, гидрохимия, водные ресурсы». Им подготовлено шесть аспирантов, из них один защитил кандидатскую диссертацию, трое вышли на защиту.

Как высококвалифицированный специалист-лимнолог, П. А. Лозовик внес неоценимый вклад в становление и развитие Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Он хорошо разбирался в вопросах гидрологии, гидрофизики, гидробиологии. К его мнению прислушивались все сотрудники института. Петр Александрович был человеком принципиальным, он

имел свою точку зрения по различным научным проблемам и всегда горячо ее отстаивал. Ученые Советы ИВПС и заседания Президиума КарНЦ РАН с его участием проходили оживленно и весьма результативно.

В 2006 году за заслуги перед республикой и многолетний добросовестный труд П. А. Лозовик был награжден Почетной грамотой Республики Карелия, а в 2017 г. ему присуждено звание заслуженного деятеля науки РК.

Петр Александрович хорошо известен за пределами Карелии. Он находился в постоянном общении с учеными из профильных институтов РАН, вузов России, ежегодно принимал активное участие в работе международных и всероссийских научных конференций и симпозиумов, выступал на заседаниях Санкт-Петербургского отделения Всероссийского химического общества им. Д. И. Менделеева. По его инициативе в 2012 году была возобновлена деятельность Всероссийского симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы», который проходил на базе КарНЦ РАН в г. Петрозаводске, а в 2017 г. – в г. Барнауле.

П. А. Лозовик был очень заботлив и внимателен к своим сотрудникам. Их успехи и огорчения воспринимал как собственные и делал все от него зависящее, чтобы помочь людям в трудную минуту. Светлая память о Петре Александровиче Лозовике навсегда останется у всех, кому посчастливилось с ним работать.

*Сотрудники Института
водных проблем Севера КарНЦ РАН*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук», с 2015 г.)

«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, 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 отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам (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, научные 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 возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень **КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ** (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом 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. 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, 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 должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicits* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (References). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. 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 бесплатной программы транслитерации на сайте <http://translit.ru/>, вариант BSI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Key words: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Частота встречаемости видов нематод в исследованных биотопах

Биотоп (площадка)	Кол-во видов	Встречаемость видов нематод в 5 повторностях				
		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %
1Н	26	8	4	1	5	8
2Н	13	2	1	1	0	9
3Н	34	13	6	3	6	6
4Н	28	10	5	2	2	9
5Н	37	4	10	4	7	12

Примечание. Здесь и в табл. 3–4: биотоп 1Н – территория, заливаемая в сильные приливы; 2Н – постоянно заливаемый луг; 3Н – редко заливаемый луг; 4Н – незаливаемая территория; 5Н – периодически заливаемый луг.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

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 vrasheniya 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. Mezvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. 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

Марьянских 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 mezvidovykh 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).

Demografiya. 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.

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

K. K. Edelstein, A. M. Alabyan, S. L. Gorin, A. A. Popryadukhin. HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE LARGEST LAKES OF THE YAMAL PENINSULA 3

A. Yu. Terzhevnik, S. D. Golosov, G. G. Gavrilenko, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, S. Yu. Volkov, N. I. Palshin, T. V. Efremova, S. R. Bogdanov. THE POSSIBLE EFFECT OF AN UNUSUAL SPRING ON THE DISSOLVED OXYGEN IN A SHALLOW LAKE DURING THE SUMMER . . . 17

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva, E. A. Vahrameeva. DISTRIBUTION OF SULFUR COMPOUNDS AS A RESULT OF THE SULFATE REDUCTION PROCESS IN FRESHWATER LAKE SVATOE 28

Yu. A. Fetisova, G. T. Frumin. CHANGES IN THE WATER QUALITY OF THE TRANSBOUNDARY LAKE PEIPUS. 38

Z. I. Slukovskii, N. V. Ilmast, I. V. Sukhovskaya, E. V. Borvinskaya, M. A. Gogolev. THE GEOCHEMICAL SPECIFICS OF MODERN SEDIMENTATION PROCESSES ON THE BOTTOM OF A SMALL LAKE LAMBA UNDER TECHNOGENIC IMPACT 45

N. A. Belkina. QUANTITATIVE AND QUALITATIVE COMPOSITION OF ORGANIC MATTER AND ITS TRANSFORMATION IN A SURFACE LAYER OF LAKE ONEGO SEDIMENTS 64

HYDROBIOLOGY

Yu. S. Datsenko, V. V. Puklalov, K. K. Edelstein. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON PHYTOPLANKTON GROWTH IN A LOW-FLOW STRATIFIED STORAGE RESERVOIR. . . 73

PALEOLIMNOLOGY

L. V. Filimonova, N. B. Lavrova. THE STUDY OF LAKE ONEGO AND ITS DRAINAGE BASIN PALEOGEOGRAPHY USING A SET OF METHODS 86

CHRONICLE

N. N. Filatov, T. I. Regerand. The 1st International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions” and a Workshop for Young Scientists (Petrozavodsk, September 11–15, 2017). 101

A. V. Puzanov, D. A. Subetto, D. M. Bezmaternykh, D. N. Troshkin, A. A. Tskhai. The 6th All-Russian Symposium with International Participation “Organic Matter and Biogenic Elements in Inland Water Bodies and Seas” (Barnaul, September 28–29, 2017). 105

BEREAVEMENTS

In memory of Petr A. Lozovik (1951–2017) 107

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 110

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 10, 2017

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

*Печатается по решению
Президиума Карельского научного центра РАН*

Выходит 12 раз в год

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-65995 от 06.06.2016 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 20.10.2017. Дата выхода 31.10.2017. Формат 60x84¹/₈.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,9. Усл. печ. л. 13,5.
Тираж 130 экз. Заказ 460. Цена свободная

Учредители: Карельский научный центр РАН; Институт биологии КарНЦ РАН;
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН; Институт геологии КарНЦ РАН; Институт леса КарНЦ РАН;
Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН

Издатель: Карельский научный центр РАН, 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