

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 3, 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.; Т. ВИХАВАЙНЕН, доктор истории, проф.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; С. П. ГРИППА, к. г. н., доцент; Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; А. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; А. М. КРЫШЕНЬ (зам. главного редактора), д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; И. И. МУЛЛОНЕН, д. фил. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. ОКРЕПИЛОВ, академик РАН, д. э. н.; О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; Ю. В. САВЕЛЬЕВ, д. э. н.; Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; 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.; N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; S. P. GRIPPA, PhD (Geog.), Assistant Prof.; A. S. ISAEV, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; A. M. KRYSHEN' (Deputy Editor-in-Chief), DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; I. I. MULLONEN, DSc (Philol.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. OKREPILOV, RAS Academician, DSc (Econ.); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); Yu. V. SAVELIEV, DSc (Econ.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); T. VIHAVAINEN, PhD (Hist.), Prof.; 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; П. А. ЛОЗОВИК, д. х. н.; Ю. Н. ЛУКИНА, д. 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; Д. А. СУБЕТТО (зам. ответственного редактора), д. г. н.; А. А. 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; P. A. LOZOVIK, DSc (Chem.); Yu. N. LUKINA, DSc (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; D. A. SUBETTO (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geog.); A. A. 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 532.59

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙШ И СЕЙШЕОБРАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МОДЕЛЬНОМ БАССЕЙНЕ, АППРОКСИМИРУЮЩЕМ ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО

Ю. В. Манилюк, Л. В. Черкесов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

С использованием результатов аналитического решения системы уравнений длинных волн исследуются сейшевые и сейшеобразные колебания (комбинация мод сейш) в модельном бассейне постоянной глубины, имеющем прямоугольную форму и характерные размеры Ладожского озера. Выполнен расчет периодов четырнадцати первых мод сейш. Найдены следующие значения: 5,22; 2,61; 2,09; 1,94; 1,74; 1,63; 1,34; 1,30; 1,11; 1,04; 1,02; 0,97; 0,93 часа. Получены оценки возможных скоростей течений и установлено, что при максимальном значении отклонения уровня равном 25 см скорость волновых течений не превышает 11 см/с для всех рассмотренных в работе мод сейш. Проанализирована пространственная структура колебаний уровня и особенности волновых течений. Дана классификация видов сейш. Рассмотрены теоретически возможные в модельном бассейне системы сейшеобразных колебаний, представляющих собой суперпозицию нескольких мод сейш. Их свойства определяются набором взаимодействующих мод. При этом колебания уровня становятся непериодическими и существенно отличаются от колебаний в случае одиночных сейш. Выделены три типа сейшеобразных колебаний. Первый соответствует случаю взаимодействия продольных и поперечных сейш. Узловые линии уровня поворачиваются с течением времени, при этом направление вращения периодически изменяется. Второй тип соответствует взаимодействию только продольных или только поперечных сейш. В этом случае количество узловых линий может изменяться со временем, они перемещаются параллельно одной из осей координат, углы, которые они составляют с осями координат, не изменяются. Третий тип соответствует взаимодействию продольной и поперечной сейш, имеющих одинаковые периоды. При этом положение узловых линий не изменяется со временем. При сейшеобразных колебаниях максимальные возвышения уровня приближаются к сумме амплитуд взаимодействующих волн, а наибольшие величины модуля скорости волновых течений во всех рассмотренных вариантах были меньше суммы скоростей течений взаимодействующих мод. Сопоставление результатов расчетов с данными натурных наблюдений показало их удовлетворительное соответствие. Материалы были представлены на V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) – «Water Resources: Research and Management» (WRRM).

Ключевые слова: колебания уровня; длинные волны; свободные волны; волновые течения; аналитические решения.

Yu. V. Manilyuk, L. V. Cherkosov. INVESTIGATION OF SEICHES AND SEICHELIKE OSCILLATIONS IN THE MODEL BASIN, APPROXIMATING THE LADOGA LAKE

Seiches (single-period) and seiche-like oscillations (superposition of different seiche modes) were studied in a constant-depth rectangular model tank with dimensions characteristic of Lake Ladoga using the results of analytical solution of a system of long wave equations. The periods of the first fourteen seiche modes were calculated. The following values were found: 5.22; 2.61; 2.09; 1.94; 1.74; 1.63; 1.34; 1.30; 1.11; 1.04; 1.02; 0.97; 0.93 hours. The possible flow velocities were estimated. It is found that where the level oscillations amplitude was within 25 cm, wave flow velocity did not exceed 11 cm/s for all the considered seiche modes. The spatial structure of level oscillations and characteristics of wave currents was analyzed. A classification of seiches has been produced. It is found that the formation of a variety of seiche-like oscillation systems is possible in Lake Ladoga. These systems represent a superposition of several seiche modes. Their properties are determined by a set of interacting modes. Level oscillations in this case are not periodic and differ substantially from oscillations in the case of a single seiche. Three types of seiche-like oscillations have been distinguished. The first one corresponds to an interaction of longitudinal and transverse seiches. Nodal lines of the level are rotated over time, and the rotation direction changes periodically. The second type corresponds to an interaction of either longitudinal or transverse seiches with different periods. In this case, the number of nodal lines may change over time. They move parallel to a coordinate axis. Angles between these lines and coordinate axes are constant. The third type corresponds to an interaction of a longitudinal and a transverse seiches with equal periods. The position of nodal lines did not change with time. Maximum level elevations of seiche-like oscillations are close to the sum of the amplitudes of the interacting waves. The greatest magnitudes of wave current velocity were in all cases lower than the sum of flow velocities of the interacting modes. The goodness of fit of the calculated results to field data was quite satisfactory. The materials were presented at the 5th International Conference of Young Scientists "Water Resources: Research and Management" (WRRM)

Key words: level oscillations; long waves; free waves; wave currents; analytical solutions.

Введение

Ладожское озеро является самым крупным в системе великих озер Европы, включающей в себя следующие озера: Сайма (4400 км²), Онежское (9890 км²), Ильмень (1100 км²), Ладожское (18 135 км²) [Калесник, 1968]. Наибольшая длина Ладожского озера 219 км, средняя ширина 80 км, средняя глубина 51 м, площадь зеркала 17 878 км² [Калесник, 1968]. Озеро судоходно и входит в состав Волго-Балтийского водного пути и Беломорско-Балтийского канала. Также оно широко используется в рекреационных целях.

Одним из важнейших элементов гидрологического режима озера являются сейши. Они вызывают колебания уровня и волновые течения, охватывающие весь объем жидкости в водоеме. При этом сейшевые течения оказывают влияние на профиль береговой черты, температуру, содержание растворенного кислорода [Лабзовский, 1971]. Скорости сейшевых течений могут достигать значительных величин. Так, в статье [Тихомиров, 1958] указывается, что

скорость течения, вызванного сейшами в Якимварском заливе Ладожского озера, достигала 78 см/с при среднем значении 17 см/с. По данным наблюдений [Калесник, 1968], на Ладоге отмечаются сейшевые колебания уровня с периодами 5 ч 40 мин, 2 ч 11 мин, 90 мин, 60 мин, 16–18 мин. Их амплитуды лежат в диапазоне от 3 до 28 см. Сейши вызываются колебаниями атмосферного давления, прохождением циклонов, воздействием ветра на поверхность озера.

Наряду с сейшевыми в озере могут существовать и сейшеобразные колебания, возникающие после прекращения действия возмущающих сил, которые представляют собой суперпозицию нескольких мод сейш.

Сейшевые колебания в Ладожском озере остаются на настоящий момент малоисследованным явлением. Основные сведения о них были получены в результате наблюдений, выполненных Комплексной ладожской экспедицией 1966 года. Отметим монографии [Калесник, 1968; Гидрологический режим..., 1966], в которых делается географическое описание этого явления. Публикации, посвященные

математическому моделированию сейш в Ладожском озере, нам неизвестны.

Целью настоящей работы является попытка теоретического исследования сейш и сейшеобразных колебаний Ладожского озера с использованием аналитического метода, основанного на решении системы уравнений длинных волн. Для этого озеро аппроксимируется прямоугольным бассейном постоянной глубины, имеющим характерные размеры Ладоги. Такое упрощение позволяет получить аналитическое решение исходной краевой задачи, дающее периоды мод сейшевых колебаний и соответствующие им собственные функции, описывающие колебания уровня и скорости волновых течений.

Материалы и методы

Направим ось x на восток, ось y – на север. Ладожское озеро будем аппроксимировать прямоугольным бассейном постоянной глубины $h = 51$ м, вытянутым в северном направлении. Длина бассейна (вдоль оси y) $b = 210$ км, ширина (вдоль оси x) $a = 84$ км. Отметим, что такая аппроксимация является достаточно грубой, т. к. не учитывается северо-западный глубоководный район. В работе [Лабзовский, 1971] указывается, что в глубоководных водоемах трение о дно сказывается мало и чаще всего развиваются «правильные» сейши. Учитывая данное обстоятельство и то, что форма Ладоги близка к прямоугольной, можно надеяться, что результаты, полученные для модельного бассейна, будут достаточно близки к реальным сейшам Ладоги и по ним можно представить физическую картину явления в первом приближении. Считая жидкость однородной, волны длинными и линейными, а атмосферное давление над акваторией бассейна постоянным, будем описывать движение жидкости системой уравнений длинных волн [Сретенский, 1977]:

$$u_t = -g\zeta_x, v_t = -g\zeta_y, \zeta_t = -(hu)_x - (hv)_y. \quad (1)$$

Здесь x, y – декартовы координаты, u, v – проекции вектора скорости движения жидкости на оси x, y соответственно, ζ – отклонение свободной поверхности, h – глубина бассейна, t – время, g – ускорение свободного падения.

На твердых боковых стенках бассейна должно выполняться условие непротекания:

$$u(0,y) = 0, u(a,y) = 0; v(x,0) = 0, v(x,b) = 0. \quad (2)$$

Решение краевой задачи (1), (2) известно. Его можно найти, например, в монографии [Праудмен, 1957; Ле Блон, Майсек, 1981].

Также в статье [Черкесов, Манилюк, 2015] приведены подробные выкладки, демонстрирующие процесс получения решения данной краевой задачи. Используя их, запишем:

$$\zeta_{km}(x,y,t) = \zeta_{0km} \cos \frac{k\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b} \cos \sigma_{km} t, \quad (3)$$

$$u_{km}(x,y,t) = \zeta_{0km} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{kb}{\sqrt{k^2 b^2 + m^2 a^2}} \times \sin \frac{k\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t, \quad (4)$$

$$v_{km}(x,y,t) = \zeta_{0km} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{ma}{\sqrt{k^2 b^2 + m^2 a^2}} \times \cos \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t, \quad (5)$$

$$\sigma_{km} = \pi \sqrt{gh} \sqrt{\frac{k^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2}}, \quad (6)$$

$$\tau_{km} = \frac{2}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{k^2 b^2 + m^2 a^2}}. \quad (7)$$

Здесь ζ_{0km} – амплитуда отклонения свободной поверхности; σ_{km} – частота колебаний жидкости; τ_{km} – период колебаний жидкости, $k = 0, 1, 2, \dots$; $m = 0, 1, 2, \dots$.

Таким образом, задавая начальную амплитуду отклонений свободной поверхности ζ_{0km} , а также значения глубины h , длины a и ширины b бассейна, определяем частоты сейшевых колебаний по формуле (6), отклонения свободной поверхности на основе соотношения (3) и составляющие волновых скоростей с помощью выражений (4), (5).

Результаты и обсуждение

Сейшевые колебания. Анализ формул (3)–(5) позволяет разделить сейши на три вида, определяемые значениями индексов k, m . У первого вида ($k \neq 0, m = 0$) u, v, ζ не зависят от координаты y , для второго вида ($k = 0, m \neq 0$) u, v, ζ не зависят от x , у третьего вида ($k \neq 0, m \neq 0$) u, v, ζ зависят от координат x и y .

Количество узловых линий уровня у каждой моды сейш равно сумме индексов $k + m$. При этом число узловых линий, параллельных оси y , равно k , а параллельных оси x равно m .

Рассмотрим особенности волновых движений, имеющих место для всех указанных выше видов сейш. Расчеты проведены для прямоугольного бассейна с указанными выше значениями a, b, h .

В таблице приведены для первых четырнадцати мод периоды и максимальные значения модулей скорости волновых течений,

Периоды сейш Ладожского озера и соответствующие им максимальные значения модуля скорости волновых течений для амплитуды отклонения свободной поверхности равной 0,25 м

Номер моды	Период, ч	k	m	V_{km}^{\max} , м/с
1	5,22	0	1	0,11
2	2,61	0	2	0,11
3	2,09	1	0	0,11
4	1,94	1	1	0,10
5	1,74	0	3	0,11
6	1,63	1	2	0,09
7	1,34	1	3	0,08
8	1,30	0	4	0,11
9	1,11	1	4	0,09
10	1,04	0	5	0,11
11	1,04	2	0	0,11
12	1,02	2	1	0,10
13	0,97	2	2	0,10
14	0,93	1	5	0,10

рассчитанные по формуле $|V_{km}| = \sqrt{U_{km}^2 + v_{km}^2}$ для амплитуды отклонения свободной поверхности равной 0,25 м. Учитывая, что мы рассматриваем здесь линейные свободные колебания жидкости, не представляет труда осуществить пересчет приводимых в данной таблице значений модулей скоростей для других значений амплитуд отклонений свободной поверхности путем умножения их на соответствующий коэффициент, который легко получить с помощью формул (4), (5).

Как видно из таблицы, наибольший период, равный 5,22 ч, имеет продольная одноузловая сейша. Периоды следующих за ней мод значительно меньше: 2,61 ч (двухузловая продольная сейша); 2,09 ч (одноузловая поперечная сейша); 1,94 ч (двухузловая продольно-поперечная сейша). Периоды некоторых мод могут быть достаточно близки (например, период седьмой моды равен 1,34 ч, а восьмой – 1,3 ч) или даже совпадать, как это имеет место для десятой и одиннадцатой мод.

Рассмотрим подробнее процесс колебаний уровня. Все изолинии уровня у сейш первого вида ($k \neq 0, m = 0$) параллельны оси y , а у сейш второго вида ($k = 0, m \neq 0$) – оси x . У сейш третьего вида параллельны осям координат только узловые линии, остальные изолинии представляют собой кривые, находящиеся в прямоугольниках, образованных пересекающимися узловыми линиями. У сейш всех рассмотренных здесь видов в прибрежных районах имеются области, в которых отклонения уровня максимальны. Так, для сейш первого вида максимальные отклонения уровня будут

в областях, расположенных в окрестности сторон прямоугольника, параллельных оси x , а для сейш второго вида – в областях, расположенных в окрестности сторон прямоугольника, параллельных оси y , для сейш третьего вида – в небольших областях, примыкающих к углам бассейна. По данным наблюдений [Гидрологический режим..., 1966], в Ладожском озере наиболее часто выделяется одноузловая сейша с периодом 5 ч 40 мин. Она хорошо видна при сравнении записей изменений уровня, полученных в пунктах Питкяранта и Кобона. Ее узловая линия расположена в 112 км от северного конца озера, а амплитуда не превышает 0,3 м. С этим хорошо согласуются результаты теоретических расчетов. Период одноузловой продольной сейши ($k = 0, m = 1$) составляет 5 ч 13 мин (см. табл.). Эта сейша относится ко второму виду. Ее узловая линия делит озеро пополам и проходит через точки с координатами $(0, b/2)$; $(a, b/2)$. Максимумы колебаний уровня находятся на северной и южной сторонах озера. В работе [Гидрологический режим..., 1966] показано существование продольной двухузловой сейши с периодом 2 ч 11 мин. Это хорошо согласуется с расчетами по формуле (2) – $\tau_{02} = 2$ ч 36 мин. Данная сейша также относится ко второму виду, и ее изолинии уровня параллельны оси x . Одна узловая линия этой сейши проходит через точки с координатами $(0, b/4)$; $(a, b/4)$, вторая – через $(0, 3b/4)$; $(a, 3b/4)$. Области, в которых колебания уровня максимальны, находятся на южной и северной границах водоема, а также на линии, проходящей через точки с координатами $(0, b/2)$; $(a, b/2)$. В работе [Гидрологический режим..., 1966] отмечается, что на озере выражены сейши с периодами 90 и 60 минут, и делается предположение, что они являются соответственно трехузловой и четырехузловой. Из таблицы видно, что период, наиболее близкий к 90 минутам, имеют две волны: трехузловая продольная сейша ($k = 0, m = 3$) с периодом, равным 104 минутам, и трехузловая продольно-поперечная сейша ($k = 1, m = 2$) с периодом, равным 98 минутам. Еще четыре моды имеют период близкий к 60 минутам: пятиузловая продольная ($k = 0, m = 5$), $\tau_{05} = 62$ мин; двухузловая поперечная ($k = 2, m = 0$), $\tau_{20} = 62$ мин; трехузловая продольно-поперечная ($k = 2, m = 1$), $\tau_{21} = 61$ мин; четырехузловая продольно-поперечная ($k = 2, m = 2$), $\tau_{22} = 58$ мин. Поэтому для их идентификации необходимо проводить наблюдения по всему периметру озера.

Амплитуды сейш в Ладожском озере изменяются в пределах от 3 до 28 см [Калесник, 1968], им соответствуют течения, охватывающие весь

объем жидкости в бассейне. В таблице приведены максимальные значения скорости волновых течений для первых четырнадцати мод, рассчитанные для амплитуды отклонения свободной поверхности равной 0,25 м. Они заключены в диапазоне 0,08–0,11 м/с. Наибольшие скорости, равные 0,11 м/с, имеют сейши первого ($k \neq 0, m = 0$) и второго ($k = 0, m \neq 0$) видов. Течение жидкости для сейш первого вида происходит параллельно оси y , а для сейш второго вида – параллельно оси x . Для сейш третьего вида направления течений составляют различные углы с осями координат. Для сейш первого и второго видов области наибольших скоростей течений находятся в окрестностях узловых линий. У сейш третьего вида изолиния скорости (для каждой моды она имеет свою величину) разделяет акваторию бассейна на ячейки. Выделяются ячейки, в которых скорость минимальная и максимальная. Для каждой моды имеют место ячейки, примыкающие к углам бассейна, в которых течения имеют минимальную интенсивность.

Направления волновых течений изменяются на противоположные каждые полпериода соответствующей моды. Модуль скорости первые полпериода возрастает от нуля до максимального значения, а затем следующие полпериода убывает до нуля. В статье [Тихомиров, 1958] приведены результаты натурных наблюдений за направлением и скоростью течений в проливах Якимварского залива, выполненных в августе 1957 г. На станции, расположенной северной острова Кюльвансари, были отмечены периодические ($T \approx 60$ мин) колебания уровня и соответствующие им изменения направления течений. При этом течение Тихомировым идентифицировано как сейшевое, т. к. в момент экстремальных значений уровня скорость течения равнялась нулю. Средняя скорость течения составляла 17 см/с. При смене направления течения температура воды изменялась на 0,7 °С. Так как течение жидкости происходило вдоль параллели, то с большой долей вероятности можно предположить, что наблюдаемая Тихомировым сейша была двухузловой поперечной сейшей Ладожского озера, которая имеет период 1,04 часа (см. табл. 1).

Сейшеобразные колебания. Возможны ситуации, когда после прекращения воздействия возмущающих сил на поверхность водоема в нем возникают свободные сейшеобразные колебания жидкости. Возмущения могут быть весьма разнообразными: в виде циклона [Еремеев и др., 2000], движущегося барического фронта [Доценко, Миклашевская, 2008], поля ветра [Иванов и др., 2015]. При этом точно

неизвестно, из чего складывается результирующее колебание поверхности водоема. Предполагается, что оно представляет собой суперпозицию нескольких мод сейш. Преимущество подхода, используемого в настоящей работе, заключается в том, что он позволяет задать точный состав взаимодействующих мод.

Рассмотрим сейшеобразные колебания, представляющие собой суперпозицию нескольких мод сейш. Расчеты показали, что в Ладожском озере возможны три типа сейшеобразных колебаний. Первый тип соответствует случаю взаимодействия продольной и поперечной сейш, второй – взаимодействию двух продольных или двух поперечных сейш с разными периодами, третий – взаимодействию продольной и поперечной сейш, имеющих одинаковые периоды. Отметим, что используемая в настоящей работе модель не позволяет определить, какие конкретно моды и их комбинации реализуются в бассейне. Для этого нужно рассматривать задачу в другой постановке: задавать начальное возмущение, после прекращения действия которого анализировать вызванные им колебания. В то же время используемая модель позволяет получить весь спектр возможных мод и поэтому пригодна для изучения физики явления.

Рассмотрим первый тип сейшеобразных колебаний на примере суперпозиции следующих мод сейш: ($k = 1, m = 0$) и ($k = 0, m = 1$); ($k = 1, m = 0$) и ($k = 0, m = 2$). При этом начальные амплитуды взаимодействующих волн выбирались равными 12,5 см.

На рисунке 1 приведены изолинии уровня для случая суперпозиции мод ($k = 1, m = 0$) и ($k = 0, m = 1$) для следующих моментов времени: а) $t = 0$; б) $t = 0,25T_{01}$. Результирующее колебание имеет одну узловую линию. В начальный момент времени она расположена на диагонали прямоугольника, проходящей с северо-запада на юго-восток (рис. 1, а). С течением времени узловая линия поворачивается вокруг центра бассейна. Ее вращение происходит сначала против часовой стрелки. На рисунке 1 (б) показано положение изолиний уровня в момент времени $t = 0,25T_{01}$. В течение интервала времени $[0, T_{01}]$, равного периоду одноузловой продольной сейши, узловая линия поворачивается на 90°. Затем направление вращения изменяется на противоположное и остается постоянным на протяжении интервала времени $(T_{01}; 2T_{01}]$. При этом узловая линия поворачивается на 90° по часовой стрелке, после чего направление ее вращения снова изменяется на противоположное.

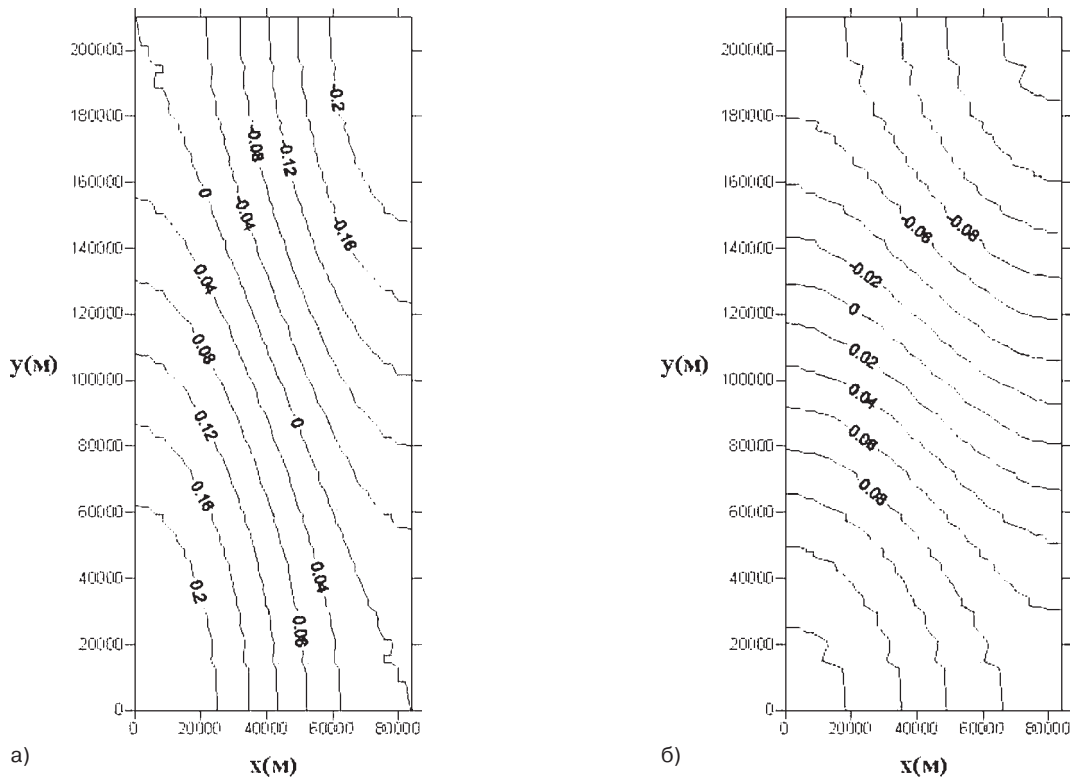


Рис. 1. Изолинии отклонения свободной поверхности $\zeta_{10} + \zeta_{01}$: а) $t = 0$; б) $t = 0,25\tau_{01}$

Система волновых течений, возникающая в результате взаимодействия мод ($k = 1, m = 0$) и ($k = 0, m = 1$), существенно отличается от волновых течений, имеющих место в случае одиночной сейши. Направления течений постоянно изменяются со временем, и векторы скорости поворачиваются сначала по часовой стрелке в продолжение интервала времени $[0, \tau_{01}]$, затем направление вращения изменяется на противоположное и на интервале $(\tau_{01}; 2\tau_{01}]$ происходит против часовой стрелки.

Рассмотрим суперпозицию одноузловой поперечной ($k = 1, m = 0$) и двухузловой продольной ($k = 0, m = 2$) сейш. На рисунке 2 приведены картины изолиний отклонения свободной поверхности $\zeta_{10} + \zeta_{02}$ для разных моментов времени: а) $t = 0$; б) $t = 0,25\tau_{02}$; в) $t = 0,3\tau_{02}$; г) $t = 0,75\tau_{02}$. Сейшеобразное колебание уровня имеет две узловые линии, которые с течением времени непрерывно изменяют свое положение. В начальный момент времени они располагаются под углом около 45° и 135° к оси x (рис. 2, а). С течением времени обе эти узловые линии поворачиваются и к моменту времени $t = 0,25\tau_{02}$ занимают положения, в которых они параллельны оси x (рис. 2, б). После чего происходит быстрое перестроение пространственной структуры колебаний, при этом изолинии уровня становятся параллельными оси y (рис. 2, в). К моменту времени $t = 0,5\tau_{02}$ они

возвращаются в исходное положение, показанное на рисунке 2 (а). Затем к моменту времени $t = 0,75\tau_{02}$ узловые линии поворачиваются, стремясь занять положение, параллельное оси y (рис. 2, г). Таким образом, узловые линии совершают вращение вокруг точек, расположенных на пересечении изолиний мод ($k = 1, m = 0$) и ($k = 0, m = 2$). При этом направления вращения узловых линий противоположны друг другу.

На рисунке 3 (а) приведены максимальные для всего бассейна значения отклонений уровня $\max(\zeta_{01} + \zeta_{10})$, а на рисунке 3 (б) максимальные значения модуля скорости волновых течений $|V_{01} + V_{10}|^{\max}$ за интервал времени $6\tau_{01}$, где τ_{01} – период продольной одноузловой сейши (мода ($k = 0, m = 1$))). Амплитуды взаимодействующих мод равны друг другу и составляют 12,5 см. В начальный момент времени максимальное отклонение уровня равно 0,25 м, т. е. сумме амплитуд обеих мод, а скорость волновых течений равна нулю.

Как видно из рисунка 3 (а), на рассмотренном интервале времени максимум отклонения уровня три раза (в моменты времени $0; 2,5\tau_{01}; 5\tau_{01}$) достигает своего наибольшего значения, равного 0,25 см. Это означает, что есть моменты времени, когда максимальное отклонение уровня равно сумме амплитуд взаимодействующих волн. Минимальные значения максимума отклонения уровня составляют около

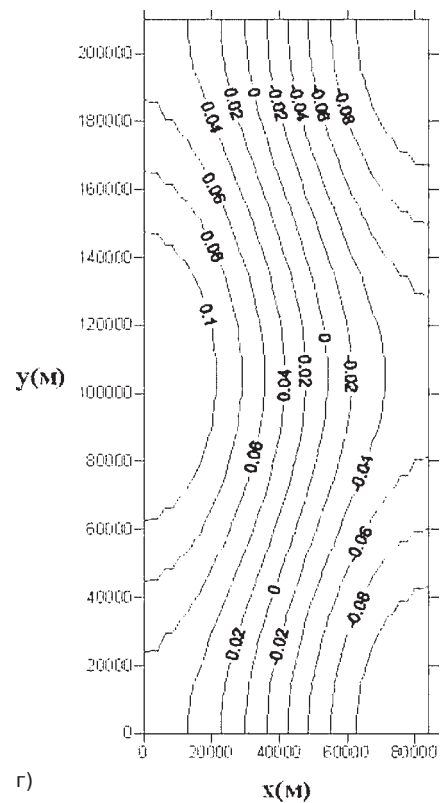
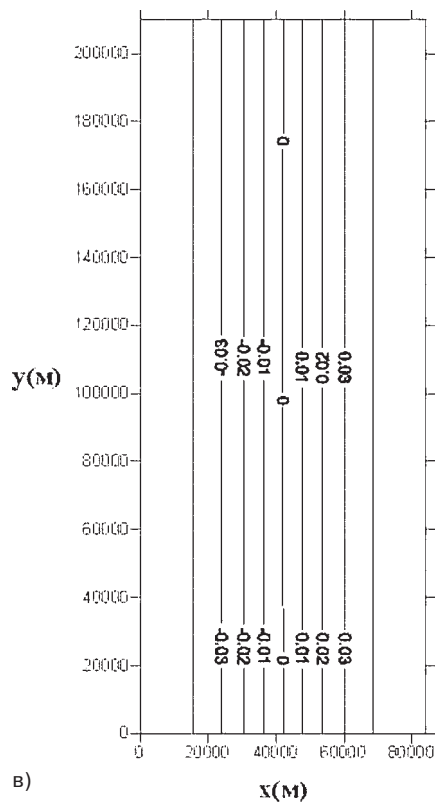
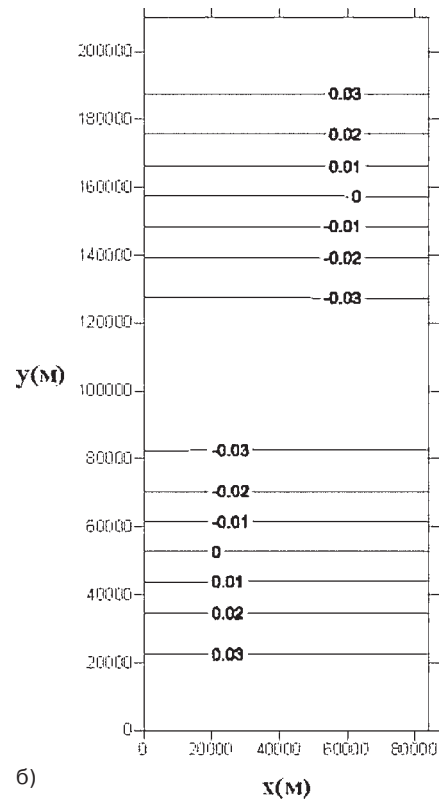
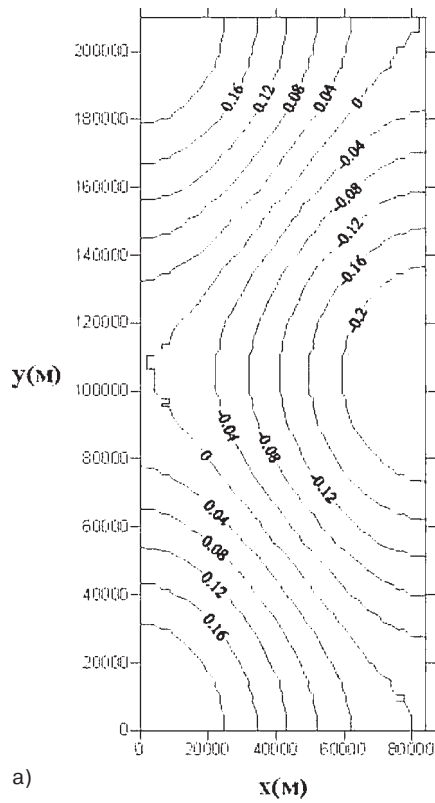


Рис. 2. Изолинии отклонения свободной поверхности $\zeta_{10} + \zeta_{02}$: а) $t = 0$; б) $t = 0,25\tau_{02}$; в) $t = 0,3\tau_{02}$; г) $t = 0,75\tau_{02}$

4 см и достигаются за рассмотренный интервал времени 5 раз (в моменты времени $0,75\tau_{01}$; $1,75\tau_{01}$; $3,25\tau_{01}$; $4,25\tau_{01}$; $5,75\tau_{01}$). Следовательно,

в любой момент времени на рассмотренном интервале максимальные отклонения уровня не равны нулю.

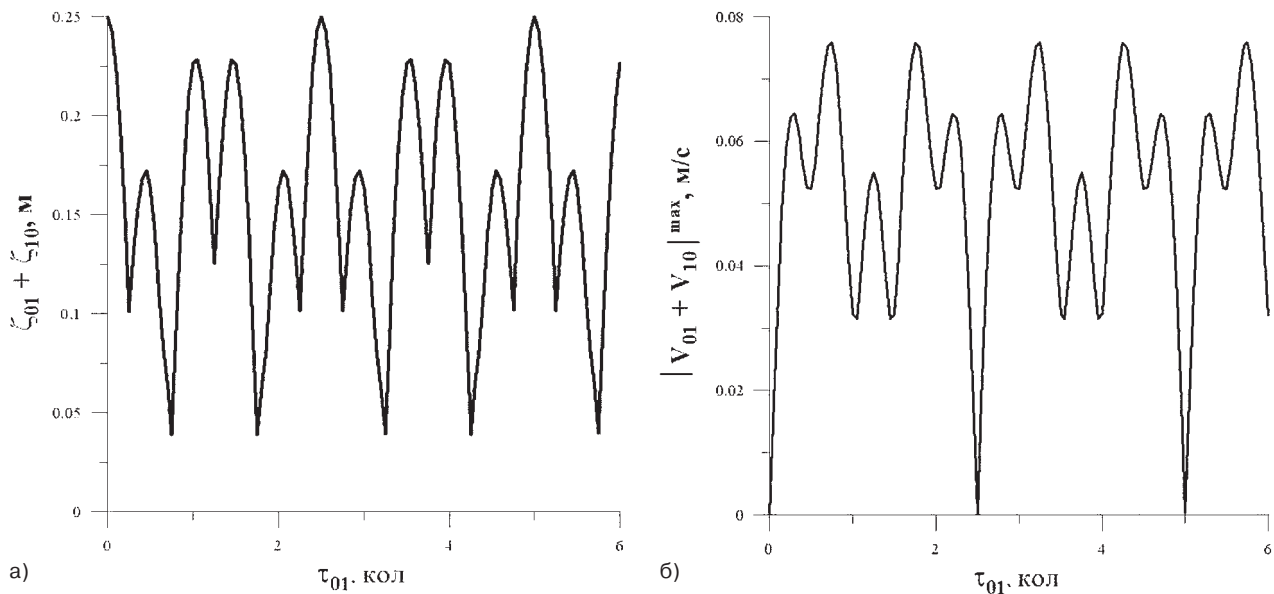


Рис. 3. Максимальные значения: а – отклонений уровня $\max(\zeta_{01} + \zeta_{10})$, б – модуля скорости волновых течений $|V_{01} + V_{10}|_{\max}$

Анализ рисунка 3 (б) показывает, что на интервале времени $[0, 6\tau_{01}]$ максимальное значение скорости волновых течений, равное 0,076 м/с, достигается в моменты времени $0,75\tau_{01}$; $1,75\tau_{01}$; $3,25\tau_{01}$; $4,25\tau_{01}$; $5,75\tau_{01}$, в которые отклонение уровня минимальное. Таким образом, наибольшее значение скорости волновых течений составляет 69 % от суммы максимальных скоростей взаимодействующих мод и достигается в моменты времени, когда отклонения уровня минимальны. Наименьшее значение максимума скорости равно нулю и достигается на рассмотренном временном интервале три раза (в моменты времени 0; $2,5\tau_{01}$; $5\tau_{01}$). При этом отклонения уровня максимальны.

Отметим также, что колебания уровня озера приобретают неперриодический характер. Значения наибольших возвышений и понижений уровня всегда равны по модулю.

Второй тип сейшеобразных колебаний соответствует взаимодействию двух продольных или двух поперечных сейш с разными периодами. При этом узловых линий может быть несколько. Их количество и положение непостоянны и изменяются с течением времени. В случае продольных сейшеобразных колебаний Ладожского озера узловые линии перемещаются вдоль оси y , а в случае поперечных – вдоль оси x . Углы, которые составляют узловые линии с осями координат, со временем не изменяются.

Третий тип сейшеобразных колебаний соответствует взаимодействию продольной и поперечной сейш, имеющих одинаковые периоды. Для Ладожского озера это моды с периодами равными 1,04 ч: $(k = 0, m = 5)$ и $(k = 2, m = 0)$.

В этом случае положение и количество узловых линий постоянное.

Таким образом, сейшеобразные колебания могут иметь разнообразный характер, определяемый структурой взаимодействующих мод. При этом с течением времени может изменяться количество узловых линий и их положение.

Выводы

1. Периоды сейш в модельном бассейне, аппроксимирующем Ладожское озеро, составляют следующие значения: 5,22; 2,61; 2,09; 1,94; 1,74; 1,63; 1,34; 1,3; 1,11; 1,04; 1,02; 0,97; 0,92 часа. Для них характерно постоянное количество узловых линий и их стационарное положение. Узловые линии всегда перпендикулярны одной из сторон бассейна.

2. Направления волновых течений при сейшевых колебаниях изменяются на противоположные каждые полпериода соответствующей моды. Максимумы скорости волновых течений не превышают 11 см/с при амплитуде отклонений свободной поверхности 25 см.

3. Установлено, что в Ладожском озере возможно образование разнообразных систем сейшеобразных колебаний, представляющих собой суперпозицию нескольких мод сейш. Их свойства определяются набором взаимодействующих мод. При этом колебания уровня становятся неперриодическими и существенно отличаются от колебаний в случае одиночных сейш. Выделены три типа сейшеобразных колебаний. Первый соответствует случаю

взаимодействия продольной и поперечной сейш. В этом случае узловые линии уровня поворачиваются с течением времени, а направление вращения периодически изменяется. Второй тип соответствует взаимодействию только продольных или только поперечных сейш. При этом количество узловых линий может изменяться со временем, они перемещаются параллельно одной из осей координат. Их углы с осями координат не изменяются. Третий тип соответствует взаимодействию продольной и поперечной сейш, имеющих одинаковые периоды. В данном случае положение узловых линий не изменяется со временем.

4. При сейшеобразных колебаниях максимальные возвышения уровня приближаются к сумме амплитуд взаимодействующих волн, а наибольшая величина модуля скорости волновых течений во всех рассмотренных вариантах была меньше суммы модулей скоростей течений взаимодействующих мод.

5. Учитывая то, что для исследований в данной работе использована достаточно грубая модель, целесообразно в будущем для получения более полной картины явления продолжить исследования с помощью численных моделей, учитывающих реальную батиметрию и профиль береговой черты. Также необходимо провести комплексные наблюдения за колебаниями уровня и скоростями течений.

Литература

Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера / Под ред. Т. И. Малининой. Л.: Ленингр. ун-т, 1966. 324 с.

References

Cherkesov L. V., Manilyuk Yu. V. Svobodnyie kolebaniya zhidkosti v ogranichennom morskome bassejne [Free liquid oscillations in bounded sea basin]. *Ekologiya, ekonomika, informatika. Sbornik statey: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system* [Ecology, Economics, Informatics. Collection of Papers: System Analysis and Mathematical Modeling of Economic and Ecological Systems]. Rostov-na-Donu: Yuzhnyi federalnyi universitet, 2015. Vol. 2. P. 678–689.

Dotsenko S. F., Miklashevskaya N. A. Generaciya seish v ogranichennyh bassejnah peremeshchayushchimisya baricheskimi frontami [Generation of seiches by moving baric fronts in restricted basins]. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* [Physical Oceanography]. 2008. No. 2. P. 3–19.

Eremeev V. N., Konovalov A. V., Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Modelirovanie dlinnykh voln v Azovskom more, vyzyvaemykh prohozhdeniem tsiklonov [Modeling of long waves generated by cyclone propagation in the

Doценко С. Ф., Миклашевская Н. А. Генерация сейш в ограниченных бассейнах перемещающимися барическими фронтами // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 2. С. 3–19.

Eremeev V. N., Konovalov A. V., Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Modelirovanie dlinnykh voln v Azovskom more, vyzyvaemykh prohozhdeniem tsiklonov // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.

Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya. Issledovanie svobodnykh kolebaniy urovnya Azovskogo моря, vznikayushchikh после прекращения длительно-го действия ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2. С. 15–24.

Kalesnik S. V. Ladozhskoe ozero. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 159 с.

Лабзовский Н. А. Непериодические колебания уровня моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 238 с.

Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. М.: Мир, 1981. Т. 1. 480 с.

Праудмен Дж. Динамическая океанография. М.: Иностранная литература, 1957. 418 с.

Сретенский Л. Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 815 с.

Тихомиров А. И. Сейшевые течения в проливах Якимварского залива Ладожского озера (наблюдения 1957 г.) // *ДАН СССР*. 1958. Т. 121, № 1. С. 149–151.

Cherkesov L. V., Manilyuk Yu. V. Svobodnyie kolebaniya zhidkosti v ogranichennom morskome bassejne // *Экология, экономика, информатика. Сборник статей: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. Т. 2. С. 678–689.

Поступила в редакцию 28.04.2016

Azov Sea]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2000. Vol. 40, no. 5. P. 658–665.

Gidrologicheskij rezhim i vodnyj balans Ladozhskogo озера [Hydrological regime and water balance of Lake Ladoga]. Ed. T. I. Malinina. Leningrad: Leningr. un-t, 1966. 324 p.

Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya. Issledovanie svobodnykh kolebaniy urovnya Azovskogo моря, vznikayushchikh после прекращениya длitel'nogo dejstviya vetra [Study of free fluctuations of the Azov Sea level arising after long-lasting wind cut]. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* [Physical Oceanography]. 2015. No. 2. P. 15–24.

Kalesnik S. V. Ladozhskoe ozero [Lake Ladoga]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 159 p.

Labzovskiy N. A. Neperiodicheskie kolebaniya urovnya моря [Non-periodic sea level fluctuations]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 238 p.

Le Blon P., Maysek L. Volny v okeane [Waves in the ocean]. Moscow: Mir, 1981. Vol. 1. 480 p.

Praudmen Dzh. Dinamicheskaya okeanografiya [Dynamical oceanography]. Moscow: Inostrannaya literatura, 1957. 418 p.

Sretenskiy L. N. Teoriya volnovyih dvizheniy zhidkosti [Fluid wave theory]. Moscow: Nauka, 1977. 815 p.

Tihomirov A. I. Sejshevye techeniya v prolivah Yakimvarского залива Ladozhского озера (nablyudeniya

1957 g.) [Seiche currents in the straits of Yakimvarsky Gulf of Lake Ladoga (observations in 1957)]. *DAN USSR [Dokl. of the Acad. of Science of the USSR]*. 1958. Vol. 121, no. 1. P. 149–151.

Received April 28, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Манилюк Юрий Владимирович

младший научный сотрудник отдела теории волн
Морской гидрофизический институт РАН
ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011
эл. почта: uvmsev@yandex.ru

Черкесов Леонид Васильевич

заведующий отделом теории волн, член-корр. НАНУ,
д. ф.-м. н., проф.
Морской гидрофизический институт РАН
ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011

CONTRIBUTORS:

Manilyuk, Yury

Marine Hydrophysical Institute
2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia
e-mail: uvmsev@yandex.ru

Cherkesov, Leonid

Marine Hydrophysical Institute
2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia

УДК 504.455

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ТЕПЛООБМЕН В ОЗЕРЕ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

С. Д. Голосов^{1,2}, И. С. Зверев¹, А. Ю. Тержевик²

¹ Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В настоящей работе эффект подледного прогрева озера рассматривается на основе данных натурных измерений, полученных на озерах Карелии и Карельского перешейка. Предложена одномерная параметризованная математическая модель явления, выполнены количественные оценки потоков тепла в системе «лед – водная масса – донные отложения».

Ключевые слова: вертикальная термическая структура; теплообмен; подледный прогрев; параметризация.

S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. Yu. Terzhevik. VERTICAL THERMAL STRUCTURE AND HEAT EXCHANGE IN ICE COVERED LAKE

In the present study the effect of under ice warming is analyzed on the basis of observed data from the Karelian Isthmus and lakes of Karelia. A simple 1D parameterized mathematical model of the phenomenon was developed. The heat fluxes in the “ice – water column – sediments” system were quantified.

Keywords: vertical thermal structure; heat exchange; under ice warming; parameterization.

Введение

Многочисленные данные натурных наблюдений за термическим режимом мелководных озер, покрытых льдом [см., например, Кузьменко, 1976, 1984; Bengtsson et al., 1995; Malm et al., 1997a; Петров и др., 2006], свидетельствуют, что в зимний период происходит перераспределение теплового запаса между донными отложениями и водной массой. Данный процесс приводит к так называемому эффекту «подледного прогрева» озера, когда в течение всего периода ледостава температура водной массы увеличивается за счет поступающего из донных отложений тепла. Сам эффект имеет

для озер – в особенности мелководных – большое значение. В частности, он препятствует промерзанию водной толщи озера до дна, предохраняя тем самым водные организмы от гибели в течение длительного зимнего периода.

В течение периода с момента образования ледового покрова и до начала ранневесеннего прогрева теплосодержание в мелком озере и его термическая структура контролируется двумя потоками, а именно теплопередачей из донных отложений в воду и теплопередачей из воды в лед. Как правило, температура воды в озере растет в течение этого периода; таким образом, теплоперенос из донных отложений является доминирующим. Теплосодержание

и его изменения в донных отложениях (наиболее значительные изменения в годовом ходе температуры происходят в верхнем 3–6-метровом слое) в мелких водоемах сравнимы – всего в несколько раз меньше – с таковыми в столбе воды. Оценки потока тепла из донных отложений в течение подледного периода [см., например, Likens, Ragotzkie, 1965; Malm et al., 1997b] лежат в диапазоне 1–5 Вт·м⁻². Поток зависит от времени и глубины в озере, с максимальными значениями в самом начале подледного периода и минимальными поздней зимой.

На рисунке 1 графически представлен эффект подледного прогрева озера на примере эволюции вертикального распределения температуры в озере Вендюрском (Карелия) в период с ноября 1995 по апрель 1996 г. [Malm et al., 1997a].

Как следует из данных, представленных на рисунке 1, водная масса озера в начале периода ледостава обладает минимальным теплозапасом. Вертикальный профиль температуры № 1 сформирован в процессе периода зимнего охлаждения озера до начала формирования ледового покрова. Сразу после образования льда на поверхности озера теплообмен с атмосферой меняется кардинальным образом. Сквозь лед он возможен только посредством молекулярной диффузии тепла из воды в атмосферу. В этих условиях в тепловом балансе озера ведущую роль начинает играть поступление тепла из донных отложений. Водная масса озера начинает достаточно быстро прогреваться (см. профиль температуры № 2 на рис. 1). Такого рода прогрев продолжается до начала ранневесеннего прогрева, сопровождающегося развитием подледной конвекции. Необходимо отметить, что в процессе перераспределения накопленного тепла между донными отложениями и водной массой теплозапас первых постоянно уменьшается, что с течением времени приводит к установлению практически линейного вертикального распределения температуры в воде (профили температуры № 3 и № 4 на рис. 1). Последнее свидетельствует о том, что процесс перераспределения тепла в системе «лед – водная масса – донные отложения» становится квазистационарным, и вертикальное распределение температуры остается практически неизменным до начала подледной конвекции.

Материалы и методы

Явление подледного прогрева озер в настоящей работе рассмотрено на основе данных натурных наблюдений за термическим режимом

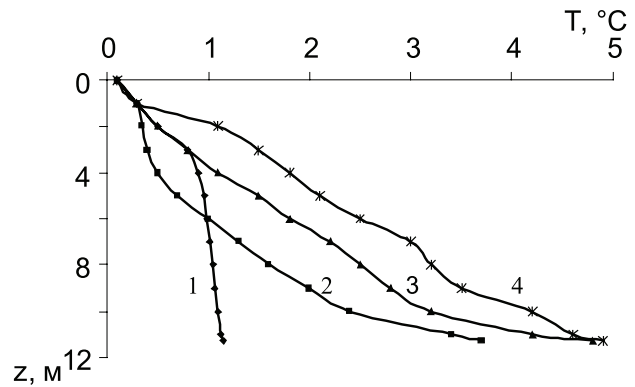


Рис. 1. Временная изменчивость вертикального распределения температуры зимой 1995–1996 г. в озере Вендюрском: 1 – начало ноября 1995 г.; 2 – конец ноября 1995 г., декабрь 1995 г.; 3 – март 1996 г. [Malm et al., 1997a], 4 – начало апреля 1996 г.

двух озер, расположенных на Северо-Западе России (Ленинградская область и Республика Карелия). Наблюдения выполнялись в зимний период в различные годы. Так, измерения на озере Красном (Ленинградская область) были выполнены зимой 1974–1975 года, тогда как измерения на озере Вендюрском (Республика Карелия) производились во время зимней измерительной кампании 1995–1996 года.

Зимний период в местах расположения озер на момент выполнения измерений имел продолжительность от 5 до 6 месяцев, толщина льда достигала 0,6–0,8 м. Оба озера являются водоемами ледникового происхождения, но при этом имеют различные морфометрические характеристики. Так, котловина озера Красного при максимальной глубине 14 метров имеет корытообразную форму, тогда как форма рельефа дна озера Вендюрского (максимальная глубина 13 метров) отличается высокой степенью изрезанности.

Данные, полученные на озерах, также существенно различаются. Так, результаты измерений, полученные на озере Красном, представляют собой вертикальные распределения температуры в водной массе и в теплоактивном слое донных отложений, имеющем толщину 4–5 метров. Измерения выполнялись ежемесячно в течение зимы 1974–1975 гг. на одной станции. Необходимо отметить, что на нижней границе теплоактивного слоя донных отложений температура остается практически постоянной в течение всего года и ее вертикальный градиент равен нулю. Это свойство было использовано при формулировке модели подледного прогрева озера. Данные, полученные на озере Вендюрском, представляют собой детальные измерения температуры водной массы озера и верхнего 10-сантиметрового слоя

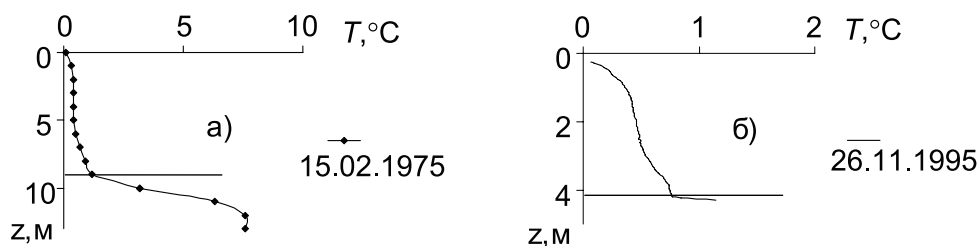


Рис. 2. Примеры вертикальных профилей температуры, полученные в обоих озерах: а) оз. Красное; б) оз. Вендюрское. Горизонтальной линией обозначена граница раздела вода-дно

донных отложений на 11 станциях регулярного поперечного разреза в центральной части водоема. Частота измерений составляла 1–2 раза в месяц. На рисунке 2 представлены примеры вертикальных распределений в обоих озерах.

Ниже приводится простая одномерная нестационарная параметризованная модель подледного прогрева озера, сформулированная на основе описанных выше данных натуральных наблюдений. С использованием модели выполнены количественные оценки вертикальных потоков тепла в мелководных озерах в подледный период.

Основные уравнения и параметризации модели

На рисунке 2 схематично представлено типичное вертикальное распределение температуры в системе «лед – водная масса – донные отложения» в мелководном озере в подледный период при отсутствии снежного покрова на поверхности льда. В принятых на схеме обозначениях вертикальная ось координат направлена вниз от поверхности льда ($z = 0$) к нижней границе теплоактивного слоя донных отложений ($z = L$), где температура T_L остается постоянной

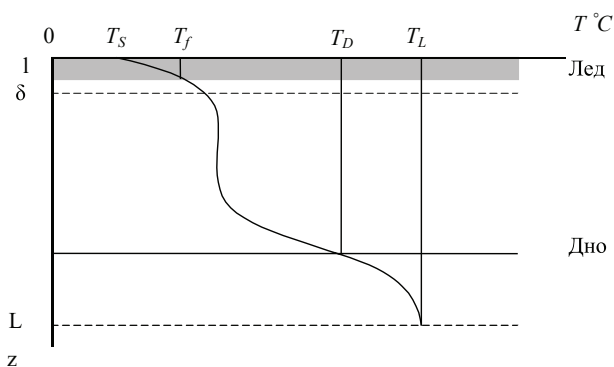


Рис. 3. Схематичное представление вертикального распределения температуры в системе «лед – водная масса – донные отложения», принятое в настоящей работе

в течение всего года; l – толщина льда, на верхней границе которого температура T_s определяется взаимодействием с атмосферой. На нижней границе льда ($z = l$) в течение всего подледного периода температура постоянна и равна температуре замерзания воды $T_f = 0^\circ\text{C}$; D – граница раздела вода-дно с температурой на ней T_D .

В одномерном случае уравнение вертикального переноса тепла в области $0 \leq z \leq L$ может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial z}, \quad (1)$$

где t – время, [с]; z – глубина, [м]; T – температура, [$^\circ\text{K}$], Q – вертикальный кинематический поток тепла, [$\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^{-1}$].

Согласно схеме, представленной на рисунке 3, вертикальный профиль температуры в рассматриваемой области может быть описан следующим параметрическим представлением:

$$T(z) = \begin{cases} T_s - (T_s - T_f) \cdot f_1\left(\frac{z}{l}\right) & \text{при } 0 \leq z \leq l \\ T_f + (T_D - T_f) \cdot f_2\left(\frac{z-l}{D-l}\right) & \text{при } l \leq z \leq D \\ T_D + (T_L - T_D) \cdot f_3\left(\frac{z-D}{L-D}\right) & \text{при } D \leq z \leq L \end{cases} \quad (2)$$

Безразмерные функции $f_1(\xi_1)$, $f_2(\xi_2)$ и $f_3(\xi_3)$, где $\xi_1 = (z/l)$, $\xi_2 = (z-l)/(D-l)$ и $\xi_3 = (z-D)/(L-D)$ – безразмерные глубины, описывают вертикальное распределение температуры во льду, водной массе и донных отложениях соответственно. Все три функции имеют очевидные граничные условия:

$$\begin{aligned} f_1(0) = f_2(0) = f_3(0) &= 0; \\ f_1(1) = f_2(1) = f_3(1) &= 1; \\ f_3'(1) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Последнее граничное условие в (3) следует из определения толщины теплоактивного слоя донных отложений (см. выше).

Ввиду того, что распределение температуры во льду в основном определяется влиянием

атмосферы, в дальнейшем нас будет интересовать только совместная эволюция температурных распределений в водной массе и донных отложениях, описываемых второй и третьей формулами параметрического представления (2).

Проинтегрируем уравнение (1) по глубине дважды – сначала в пределах от l до D , принимая во внимание вторую формулу (1), а затем в пределах от D до L с использованием третьей формулы (1). В результате получаем два обыкновенных дифференциальных уравнения, связывающих теплообмен в системе «вода – донные отложения» с основными параметрами представления (2):

$$\frac{dT_D}{dt} \cdot (D-L) \cdot \alpha_2 = -Q_D + Q_l + T_D \cdot \alpha_2 \cdot \frac{dl}{dt} - T_D \cdot (D-L) \cdot \frac{d\alpha_2}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{dT_D}{dt} \cdot (L-D) \cdot (1-\alpha_3) + (T_L - T_D) \cdot (L-D) \cdot \frac{d\alpha_3}{dt} = Q_D \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \int_0^1 f_2(\xi_2) d\xi_2; \quad \alpha_3 = \int_0^1 f_3(\xi_3) d\xi_3$$

Уравнения (4) и (5) содержат шесть параметров, подлежащих определению, а именно: придонную температуру T_D , потоки тепла Q_D и Q_l через границы вода-дно и вода-лед соответственно, l – толщину льда, а также параметры α_2 и α_3 , являющиеся интегралами от соответствующих функций $f_2(\xi_2)$ и $f_3(\xi_3)$. Что касается толщины льда, то для расчета ее временной эволюции могут быть использованы модели, специально предназначенные для решения данной задачи [см., например, Румянцев и др., 1986; Patterson, Hamblin, 1988]. Отметим, что члены уравнений (4) и (5), содержащие производные от интегральных параметров α_2 и α_3 , описывают перераспределение тепла между донными отложениями и водной массой в зимний период. Таким образом, для замыкания системы уравнений (4) и (5) необходимы три дополнительных соотношения, которые могут быть получены следующим образом.

Согласно (3) функция $f_2(\xi_2)$ имеет два независимых от времени граничных условия – $f_2(0) = 0$ и $f_2(1) = 1$, которых недостаточно для определения временной изменчивости функции. В рамках одномерной модели зависимое от времени дополнительное граничное условие не может быть поставлено на нижней границе льда, поскольку неизвестна толщина прилегающего к ней слоя молекулярной теплопроводности. Однако такое условие для производной функции $f_2(\xi_2)$ может быть определено на границе раздела вода-дно ($\xi_2 = 1$),

если принять во внимание физические свойства этой границы. Обычно верхний слой донных отложений имеет высокую пористость (~95%) и влагонасыщенность (90–95%). Это позволяет в первом приближении считать его теплофизические свойства близкими к свойствам придонной воды. В таком случае выражение для потока тепла через границу раздела вода-дно может быть записано в виде

$$Q_D = -\lambda_{eff} \cdot \frac{dT}{dz}, \quad (6)$$

где λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности в воде [$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$], dT_w/dz – вертикальный градиент температуры в придонном слое воды. Принимая во внимание вторую формулу в (2), выражение (6) может быть переписано в виде

$$-\lambda_{eff} \cdot \frac{T_D}{D-l} \cdot \frac{df_2}{d\xi_2} = Q_D \quad \text{при } \xi_2 = 1. \quad (7)$$

О способах оценки величины λ_{eff} будет сказано ниже.

Таким образом, функция $f_2(\xi_2)$ имеет теперь три граничных условия, из которых одно является зависимым от времени:

$$f_2(0) = 0; \quad f_2(1) = 1, \quad f_2'(1) = A,$$

$$\text{где } A = -\frac{Q_D \cdot (D-l)}{\lambda_{eff} \cdot T_D}. \quad (8)$$

Последнее граничное условие в (8) определяет изменчивость функции во времени. Теперь в соответствии с (8) функция $f_2(\xi_2)$ может быть выражена в виде полинома третьей степени с зависимыми от времени коэффициентами:

$$f_2(\xi_2) = (2-A) \cdot \xi_2 + (A-1) \cdot \xi_2^2. \quad (9)$$

Для определения временной изменчивости функции $f_3(\xi_3)$ также необходимо дополнительное граничное условие, аналогичное третьему условию в (8). Согласно (3) $f_3(\xi_3)$ имеет три независимых от времени граничных условия: $f_3(0) = 0$, $f_3(1) = 1$, $f_3'(1) = 1$. Повторяя рассуждения, приведшие к выводу выражения (6), и принимая во внимание третью формулу в параметризации (2), дополнительное граничное условие может быть сформулировано в виде

$$-\lambda_{eff} \cdot \frac{(T_L - T_D)}{(L-D)} \cdot \frac{df_3}{d\xi_3} = Q_D \quad \text{при } \xi_3 = 0. \quad (10)$$

Данное условие, аналогично выражению (7), определяет изменчивость функции $f_3(\xi_3)$ во времени. Теперь искомая функция может быть выражена полиномом третьей степени с зависимыми от времени коэффициентами:

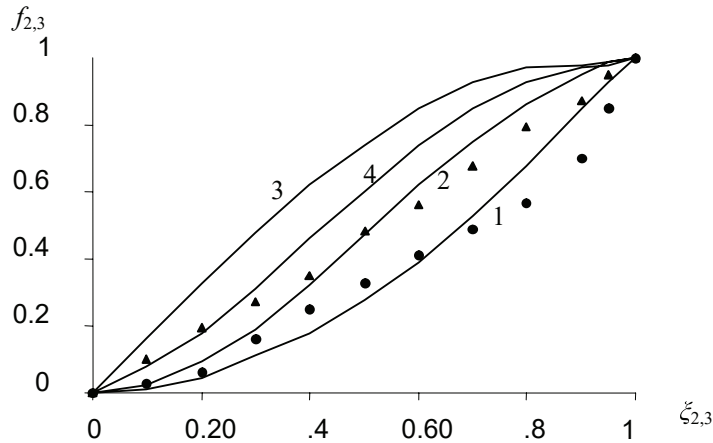


Рис. 4. Безразмерные вертикальные профили температуры в системе «водная масса – донные отложения» в период ледостава. Кривые 1 и 2 – результаты моделирования профилей температуры в озере Вендюрском в ноябре 1995 и марте 1996 г. соответственно; кривые 3 и 4 – то же для донных отложений. Символами обозначены измеренные профили температуры в водной массе озера в ноябре (●) и марте (▲)

$$f_3(\xi_3) = B\xi_3 + (3 - 2B)\xi_3^2 + (B - 2)\xi_3^3, \quad (11)$$

где $B = -\frac{Q_D \cdot (L - D)}{\lambda_{eff} \cdot (T_L - T_D)}$.

Значение эффективного коэффициента температуропроводности λ_{eff} может быть оценено из простого соотношения, связывающего линейный масштаб профиля температуры в водной массе со временем, в течение которого происходит его деформация,

$$\lambda_{eff} = \frac{(D - l)^2}{t_*}, \quad (12)$$

где t_* – длительность ледостава до начала подледной конвекции.

Верификация полиномов (10) и (11) была выполнена с использованием данных натуральных наблюдений, полученных на озере Вендюрском [Malm et al., 1997a, b]. Результаты верификации представлены на рисунке 4. Кривые 1 и 2 соответствуют вертикальным профилям температуры в водной массе, измеренным в ноябре 1995 и марте 1996 г. Очевидно, что профиль № 2 соответствует большему теплосодержанию водной массы. Более того, температурное распределение, описываемое данной кривой, близко к линейному, что отражает квазистационарный режим вертикального теплообмена в озере в конце подледного периода. Кривые 3 и 4 описывают профили температуры в донных отложениях в ноябре 1995 и марте 1996 года. Кривая 4 показывает, что теплосодержание донных отложений за указанный период уменьшилось по сравнению с начальным моментом времени (кривая 3). При этом профиль температуры в донных отложениях также стремится

к линейному, что полностью соответствует описанному выше характеру вертикального переноса тепла в конце периода ледостава.

И, наконец, последнее, замыкающее систему уравнений (4) и (5) выражение для потока тепла на границе раздела вода-лед Q_l легко может быть получено следующим образом. Запишем уравнение для потока тепла в виде

$$Q_l = -\lambda_{eff} \cdot \frac{dT}{dz} \Big|_{z=l}, \quad (13)$$

или, принимая во внимание вторую формулу в параметризации (2) и полином для этой функции (9),

$$Q_l = -\lambda_{eff} \cdot \frac{T_D}{(D - l)} \cdot (2 - A). \quad (14)$$

Таким образом, система уравнений (4), (5), (9), (12) и (14) является замкнутой и представляет собой модель вертикального теплообмена между водной массой и донными отложениями в озере в период ледостава.

Результаты моделирования

Описанная выше модель была применена для воспроизведения временной динамики вертикального распределения температуры в водной массе и донных отложениях в озере Красном в зимний период 1974–1975 гг. Результаты расчетов и данные натуральных наблюдений представлены на рисунке 5. Сравнение результатов моделирования с натурными данными свидетельствует, что модель вполне соответствует реальным процессам,

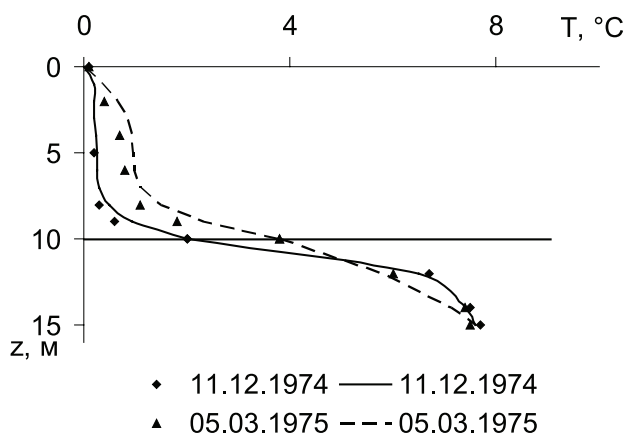


Рис. 5. Временная изменчивость вертикального распределения температуры в озере Красном в зимний период 1974–1975 гг. Символами обозначены данные натурных измерений, линии – результаты моделирования. Сплошная горизонтальная линия обозначает границу раздела вода-дно

происходящим в озере в период ледостава. Так, в частности, модель адекватно описывает перераспределение тепла между донными отложениями и водной массой. Кроме того, модель воспроизводит изменение формы вертикального профиля температуры как в водной массе, так и в донных отложениях.

Кроме того, на рисунке 6 представлены количественные оценки вертикальных потоков тепла в обоих озерах в подледный период, полученные с использованием модели и данных натурных наблюдений на озере Вендюрском.

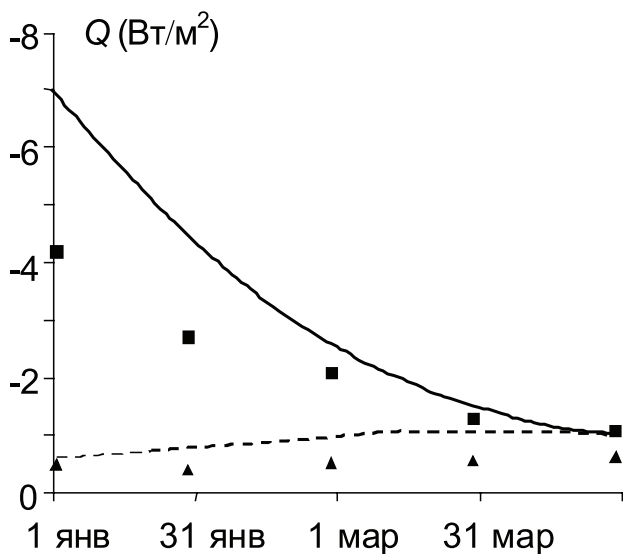


Рис. 6. Потоки тепла через границу раздела вода-дно (Q_D) и вода-лед (Q_P) в озерах Красном (линии) и Вендюрском (символы). Сплошная и прерывистая линии – потоки Q_D и Q_P , рассчитанные для озера Красного (1974–1975), квадраты и треугольники – те же потоки для озера Вендюрского, оцененные по данным наблюдений [Malm et al., 1997a, b].

Основные выводы

Особый интерес представляет собой сравнение потоков тепла Q_D и Q_P , рассчитанных по модели для озера Красного, с аналогичными потоками для озера Вендюрского, оцененными по данным натурных наблюдений. Такого рода сравнение позволяет сделать следующие выводы о специфике вертикального теплообмена в мелководных озерах в период ледостава:

1) в начальный период ледостава поступление тепла из донных отложений в водную массу в несколько раз превосходит отток тепла через границу раздела вода-лед, что и является первопричиной эффекта подледного прогрева озера;

2) несмотря на различия в географическом положении озер (озеро Вендюрское расположено приблизительно в 500 км северовосточнее озера Красного), а следовательно, и в условиях накопления тепла донными отложениями, а также несмотря на то, что расчеты для озера Красного были выполнены для зимы 1974–1975 гг., а измерения на озере Вендюрском проводились зимой 1996 года, очевидна качественная схожесть процессов вертикального переноса тепла в различных мелководных озерах; пространственные, климатические и временные различия отражаются только в абсолютных значениях потоков тепла, что объясняется большим теплозапасом донных отложений в озере Красном к моменту формирования ледового покрова;

3) равенство потоков тепла через границу раздела вода-лед в различных озерах свидетельствует о том, что процессы образования и дальнейшего развития ледового покрова в озерах протекают сходным образом и в основном зависят от атмосферного воздействия;

4) в конце периода ледостава все вертикальные потоки в озерах становятся равными, что доказывает существование в них квазистационарного режима переноса тепла.

Литература

Кузьменко Л. Г. Термический режим водной массы и донных отложений озера // Биологическая продуктивность озера Красного и условия ее формирования. Л.: Наука, 1976. С. 18–36.

Кузьменко Л. Г. Сезонная структура термического состояния озер // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 45–60.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 1–9.

Румянцев В. А., Разумов Е. В., Зилитинкевич С. С. Параметризованная модель сезонных изменений температуры в озере (с приложением к проблеме озера Севан). Л.: Институт озераведения АН СССР, 1986. 74 с.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. A field study of thermo- and hydrodynamics in a small Karelian Lake during late winter. Sweden, Lund Univ. Rep. No. 3185. 1995. 72 p.

Likens G. E., Ragotzkie R. A. Vertical water motions in a small, ice-covered lake // *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 2333–2344.

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

hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during winter 1995/1996. Sweden, Lund Univ. Rep. No 3213. 1997a. 203 p.

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: 2. Heat and mass fluxes // *Nordic Hydrol.* 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Patterson J. C., Hamblin P. F. Thermal simulation of a lake with winter ice cover // *Limnol. Oceanogr.* 1988. Vol. 33. P. 323–338.

Поступила в редакцию 17.08.2016

References

Kuz'menko L. G. Termicheskiy regime vodnoy massy i donnykh otlozhenij ozera [Thermal regime of lake water mass and sediments]. *Biologicheskaya produktivnost' ozera Krasnogo i usloviya ee formirovaniya* [Biological Productivity of Lake Krasnoye and its Formation Conditions]. Leningrad: Nauka, 1976. P. 18–36.

Kuz'menko L. G. Sezonnaya struktura termicheskogo sostoyaniya ozer [Seasonal structure of lakes thermal state]. *Osobennosti formirovaniya kachestva vody v raznotipnykh ozerakh Karel'skogo peresheika* [Features of Water Quality Formation in Lakes of Different Types of the Karelian Isthmuth]. Leningrad: Nauka, 1984. P. 45–60.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Osobennosti termicheskoi struktury melkovodnogo ozera v nachale zimy [Thermal structure peculiarities of a shallow lake in the beginning of winter]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2006. Vol. 33, no. 2. С. 1–9.

Rumyantsev V. A., Razumov E. V., Zilitinkevich S. S. Parametrizovannaya model' sezonnykh izmenenij temperatury v ozere (s prilozheniyem k probleme ozera Sevvan) [Parameterized model of seasonal temperature

changes in a lake (application to Lake Sevan)]. Leningrad: Institute of Limnology RAS, 1986. 74 p.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. A field study of thermo- and hydrodynamics in a small Karelian Lake during late winter. Sweden, Lund Univ. Rep. No 3185. 1995. 72 p.

Likens G. E., Ragotzkie R. A. Vertical water motions in a small, ice-covered lake. *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 2333–2344.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during winter 1995/1996. Sweden, Lund Univ. Rep. No 3213. 1997a. 203 p.

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: 2. Heat and mass fluxes. *Nordic Hydrol.* 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Patterson J. C., Hamblin P. F. Thermal simulation of a lake with winter ice cover. *Limnol. Oceanogr.* 1988. Vol. 33. P. 323–338.

Received August 17, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Голосов Сергей Дмитриевич

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

эл. почта: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

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

CONTRIBUTORS:

Golosov, Sergey

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

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

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Zverev, Ilya

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

e-mail: lliazverev@mail.ru

Тержевик Аркадий Юрьевич

ведущий научный сотрудник, к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ark1968@list.ru

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1968@list.ru

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.531:556.535.8 (470.22)

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ СИСТЕМЫ Р. КЕНТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕХНОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ

П. А. Лозовик, Н. Е. Галахина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

На основании данных многолетних гидрохимических наблюдений (1970–2015 гг.) выявлены изменения химического состава воды хвостохранилища и системы р. Кенти в результате техногенного влияния Костомукшского ГОК. Установлено, что основное влияние на систему р. Кенти стали оказывать попуски воды из хвостохранилища, которые привели к существенному увеличению минерализации воды, концентрации K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ni, Li и к уменьшению содержания органического вещества по сравнению с природным состоянием. С использованием приоритетных показателей, отражающих техногенное влияние, выполнена оценка загрязнения воды хвостохранилища и водоемов системы р. Кенти.

Ключевые слова: антропогенное воздействие; Костомукшский ГОК; хвостохранилище; система р. Кенти.

P. A. Lozovik, N. E. Galakhina. CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE KENTI RIVER SYSTEM WATER UNDER HUMAN IMPACT

Changes in the water chemical composition in the tailings pond and the Kenti lake-river system under the impact of the Kostomuksha mining and processing plant were determined using data of long-term hydrochemical observations (1970–2015). It was found that releases from the tailings pond influenced the Kenti river system the most, and led to a significant increase in water salinity, concentrations of K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ni and Li, and to a decrease in organic matter content in comparison with the natural state. Pollution of the tailings pond waters and Kenti river system was estimated using high-priority pollution indices.

Keywords: human impact; Kostomuksha mining and processing plant; tailings pond; Kenti lake-river system.

Введение

Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК) является крупнейшим

предприятием горнодобывающей промышленности Республики Карелия и на протяжении длительного времени (с 1982 г.) оказывает антропогенное воздействие на окружающую

среду. К источникам загрязнения воздушной и водной среды относятся выбросы в атмосферу, а также техногенные воды и отвалы вскрышных пород. Деятельность комбината связана с производством железных окатышей из руды Костомукшского и Корпангского месторождений. С 1994 г. с целью предотвращения затопления насосной станции производятся попуски воды из хвостохранилища в систему р. Кенти (их объемы в 1994–2010 гг. составляли 9–24 млн м³ в год (в среднем 13,1)), которые осуществляются пропорционально водности года до достижения концентрации K⁺ в контрольном створе 50 мг/л. Попуски воды из хвостохранилища явились существенным источником загрязнения водной среды. Цель работы заключалась в установлении закономерностей изменения химического состава водоемов системы р. Кенти в многолетнем плане в результате техногенного влияния.

Таблица 1. Гидрологические показатели озер системы р. Кенти [Озера..., 2013]

Озеро	h _{ср} , м	F, км ²	W, млн м ³	τ, год
Поппаллярви	4,3	1,6	6,9	0,16
Койвас	4,1	21,4	87,7	0,61
Кенто	3,8	30,8	117	0,55

Река Кенти (рис. 1) протекает через ряд озер и впадает в оз. Среднее Куйто, ее протяженность составляет 75 км, а водосбор является частным водосбором р. Кеми [Влияние..., 1995]. Гидрологические показатели некоторых водоемов системы р. Кенти приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, верхнее оз. Поппаллярви является высокопроточным, а нижние озера системы характеризуются более замедленным водообменом.

Верхний водоем системы, оз. Костомукшское, превращен в хвостохранилище Костомукшского



Рис. 1. Карта-схема системы р. Кенти

Таблица 2. Органическое и взвешенное вещество, pH, O₂ и CO₂ в воде оз. Костомукшского за многолетний период

Год исследования	ЦВ, град.	ПО, мгО/л	БПК ₅ , мгО ₂ /л	O ₂ , %	CO ₂ , мг/л	pH	Взв. в-во, мг/л
1970	50	9,2	0,9	88*/31**	2,0*/9,6**	6,4	0,2
1972	80	13,1	0,3	69	5,7*/11,4**	6,9	1,1
1973	-	-	-	52	7,9*/15,1**	6,3	-
1974	72	10,4	1,0	93*/49**	5,3	6,6	2,0
1975	73	15,6	1,3	81	4,6	6,5	0,6
1976	55	9,4	2,0	85	3,9	6,6	1,3
1977	61	10,4	2,6	84	2,0*/4,8**	6,6	3,1
1978	70	12,7	0,6	79*/36**	5,2*/13,1**	6,4	1,3

Примечание. *Поверхностный горизонт, **придонный горизонт, прочерк – данные отсутствуют.

ГОК для оборотного водоснабжения комбината, а также для захоронения отходов производства (хвостов). В систему р. Кенти с 1994 г. осуществляются регулируемые попуски воды из хвостохранилища, которые и оказывают на нее основное техногенное влияние.

В основу работы положены многолетние гидрохимические материалы, собранные в результате комплексных исследований водоемов района Костомукши. Наблюдения за состоянием водных объектов системы р. Кенти ведутся с 70-х годов XX века и по настоящее время [Харкевич и др., 1980; Харкевич, Митина, 1984; Феоктистов, Ипатова, 1985; Феоктистов, Морозов, 1985; Феоктистов и др., 1992; Морозов, 1998; Поверхностные воды..., 2001; Лозовик, Калмыков, 2007; Лозовик и др., 2007, 2010; Кулакова, Лозовик, 2012]. Весь этот временной промежуток можно разделить на три периода:

1. 1970–1978 гг. – до эксплуатации железорудного месторождения, когда водоемы находились в естественном состоянии;
2. 1984–1993 гг. – период выхода комбината на проектные показатели, эксплуатация хвостохранилища в бессбросовом режиме;
3. 1994–2015 гг. – период регулируемых попусков воды из хвостохранилища в систему р. Кенти.

Химические анализы воды выполнялись по аттестованным методикам [Руководство..., 2009] в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, аккредитованной в системе аккредитации аналитических лабораторий России. Достоверность химических анализов проверялась внутренним и внешним контролем. Последний осуществлялся в рамках международного проекта ICP-Waters [Intercomparison..., 2015] и внутрироссийского проекта «Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах» [2015], проведенного лабораторией в 2015 г.

Изменение химического состава воды хвостохранилища в многолетнем плане

В результате превращения озера Костомукшского в хвостохранилище произошло существенное изменение его гидрологического режима [Пальшин и др., 1994]. Так, уровень воды в озере поднялся со 157,12 до 180,30 м БС (июль 1993 г.), существенно увеличилась площадь зеркала (от 5,18 до 34,2 км²) и объем воды (от 0,017 до 0,430 км³). С вводом в эксплуатацию водоотводных каналов (южного и северо-западного) уменьшилась площадь водосбора хвостохранилища со 142 до 68,4 км². Период условного водообмена в естественном состоянии составлял 0,23 года, а в настоящее время в соответствии со средними попусками воды из хвостохранилища – около 30 лет.

Анализ гидрохимического режима оз. Костомукшского в естественном состоянии выполнен по данным наблюдений ОВП КФ АН СССР в 1970–1978 гг. Вода оз. Костомукшского до превращения его в хвостохранилище характеризовалась невысокой минерализацией в пределах 17–30 мг/л. В 1970–1978 гг. самая высокая минерализация наблюдалась в зимний период, как правило, в придонных слоях воды, что обусловлено усилением подземного питания озера в это время года. По ионному составу вода относилась к гидрокарбонатному классу группы кальция.

Поскольку оз. Костомукшское было высокопроточным водоемом, это сказывалось на содержании органического вещества (ОВ) и его сезонной динамике. По величинам косвенных показателей содержания ОВ (цветность (ЦВ), перманганатная окисляемость (ПО)) вода оз. Костомукшского в естественном состоянии относилась к мезогумусному типу, а в отдельные годы – к мезополигумусному. Цветность воды за период 1970–1978 гг. изменялась в пределах 50–80 град., ПО – 9–13 мгО/л (табл. 2).

Таблица 3. Некоторые показатели химического состава воды оз. Костомукшского (1970–1978 гг.) и хвостохранилища (1984–2015 гг.)

Год исследования	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Σ _и	pH	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Классификация по Алекину
	мг/л				мгN/л		
1970–1978	0,8	2,5*	21,1	6,5	0,11	0,006	HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺
1984	59	31,2	247	8,0	0,06	0,24	HCO ₃ ⁻ , K ⁺
1987–1993	105	69,5	380	8,2	0,04	0,95	HCO ₃ ⁻ , K ⁺
1994–2015	158	228	609	8,0	0,3	7,5	HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , K ⁺ (1994–1998 гг.) SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , K ⁺ (1998–2002 гг.) SO ₄ ²⁻ , K ⁺ (2003–2015 гг.)

Примечание. *За содержание сульфатов взято среднерегиональное фоновое значение для водных объектов района Костомукши.

Содержание биохимически легкоокисляемых ВВ в воде озера было невысоким (БПК₅ – 0,3–1,3 мгО₂/л), за исключением 1976 и 1977 г. (БПК₅ – 2,0–2,6 мгО₂/л). Из отдельных органических веществ в воде оз. Костомукшского были определены нефтепродукты и летучие фенолы. Нефтепродукты обнаружены в низких концентрациях, и их содержание в единичных пробах не превышало 0,04 мг/л. Летучие фенолы в воде оз. Костомукшского присутствовали редко.

Величина pH находилась в пределах 6,3–6,9 на протяжении всего периода наблюдений. Максимальная концентрация СО₂ наблюдалась зимой (9,7–15,1 мг/л) и в придонных слоях летом (3,0–9,6 мг/л). Насыщение воды кислородом было выше 80 %, но ко дну в отдельные годы оно снижалось до 30 %.

Содержание железа в воде оз. Костомукшского на протяжении рассматриваемого периода исследований изменялось в пределах 0,19–1,56 мг/л, кремния – от 0,8 до 4,9 мг/л.

Вода указанного водоема отличалась низким содержанием фосфора. Концентрации минерального фосфора колебались в пределах 2–6 мкг/л, а общего – 10–20 мкг/л. Азот был представлен преимущественно органической формой (0,48–0,72 мгN/л). На втором месте находился аммонийный азот, его среднее содержание по сезонам года изменялось в пределах 0,07–0,16 мгN/л. Концентрация нитратов варьировала от <0,01 до 0,02 мгN/л. Нитритный азот найден в единичных пробах и не более 0,007 мгN/л.

Таким образом, в период 1970–1978 гг. в естественном состоянии оз. Костомукшское являлось мезогумусным водоемом, маломинерализованным, со слабокислой реакцией среды. В нем отмечалось низкое содержание биогенных элементов, а также высокие концентрации железа, что является типичной картиной для поверхностных вод Карелии.

В химическом составе оз. Костомукшского, превращенного в хвостохранилище, с вводом в эксплуатацию Костомукшского ГОК постепенно происходили существенные изменения, о чем свидетельствуют данные многолетних гидрохимических наблюдений лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. Формирование химического состава воды хвостохранилища происходит за счет поступления оборотной воды с производственного цикла, рудничных вод, а также поверхностного притока с водосбора, выпадения атмосферных осадков на водную поверхность и испарения.

Данные, полученные в период 1984–1993 гг. (табл. 3), позволили проследить изменение гидрохимического режима хвостохранилища на разных стадиях его наполнения [Феоктистов, Сало, 1990].

Уже в 1984 г. минерализация воды превысила фоновые значения почти в 10 раз и составляла 247 мг/л, а в 1993 г. достигла 420 мг/л. Среди главных ионов в большей степени увеличилась доля калия, гидрокарбонатов и сульфатов.

Высокое содержание ионов K⁺ обуславливает аномальные соотношения ионов щелочных металлов ([Na⁺]/[K⁺]) и щелочно-земельных к щелочным ([Ca²⁺+Mg²⁺]/[Na⁺+K⁺]), нехарактерные для природных вод, что существенно сказывается на выживаемости некоторых гидробионтов [Дубровина и др., 1995]. Так, если в естественном состоянии эти соотношения составляли [Na⁺]/[K⁺] – 3,50 и [Ca²⁺+Mg²⁺]/[Na⁺+K⁺] – 2,78, то к 1993 г. их значения снизились до 0,17 и 0,50 соответственно. По ионному составу вода хвостохранилища по сравнению с естественным состоянием оз. Костомукшского превратилась в гидрокарбонатно-калиевую (табл. 3). Кроме того, наблюдалось постоянное увеличение эквивалентной доли сульфатов и уменьшение гидрокарбонатов.

С превращением оз. Костомукшского в хвостохранилище в нем снизилось содержание

Таблица 4. Средние концентрации форм азота в воде хвостохранилища

Год исследования	N _{орг}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
	мгN/л			
1984–1985	0,58	0,06	0,002	0,24
1987	0,72	0,00	0,001	0,21
1988	0,47	0,04	0,002	1,17
1989	-	0,08	0,002	1,72
1993	0,94	0,02	0	0,69

органического вещества. Величины ПО и цветности в 1993 г. составили 3,2 мгО/л и 29 град. против 12,7 и 70 в 1978 г. соответственно. Связано это с тем, что в водоеме происходило увеличение доли техногенных вод с низким содержанием ОВ по сравнению с приточными водами с водосборной территории.

В период 1984–1993 гг. отмечен рост концентрации некоторых форм азота (табл. 4), а именно нитратов, за счет поступления их в хвостохранилище с рудничными водами.

В период 1984–1993 гг. наблюдалось увеличение содержания такого микрокомпонента, как литий. Так, если его природные фоновые величины в водоемах района Костомукши <2 мкг/л, то к 1993 г. содержание в хвостохранилище возросло до 5,9 мкг/л. Загрязнения тяжелыми металлами (Cu, Ni, Pb, Cd, Zn) в указанные годы обнаружено не было.

На начальном этапе эксплуатации хвостохранилища в воде резко увеличилось содержание железа и взвешенных веществ. Так, в 1984 г. концентрация взвешенных веществ достигала 112 мг/л, по мере наполнения хвостохранилища количество взвеси и железа уменьшалось и в 1993 г. не превышало 2 и 0,1 мг/л соответ-

ственно. Высокие концентрации железа и взвешенных веществ, а также Р_{общ} (в 1984–1985 гг. его содержание достигало 220–380 мкг/л, причем подавляющая часть находилась во взвешенном состоянии, а к 1993 г. оно снизилось до 20 мкг/л) в первые годы эксплуатации хвостохранилища связаны со взмучиванием естественных донных отложений, накопленных в оз. Костомукшском. В дальнейшем при аккумуляции пульпы на дне водоема, которая характеризуется большой плотностью, этот эффект был утрачен.

Таким образом, уже на начальном этапе эксплуатации хвостохранилища произошли изменения в его химическом составе. К 1993 г. вода в нем стала высокоминерализованной со слабощелочной реакцией среды, гидрокарбонатно-калиевого типа с низким содержанием органического вещества и железа.

С 1994 г. начались регулируемые попуски воды хвостохранилища в систему р. Кенти, и, согласно полученным гидрохимическим данным, в этот период происходит дальнейшее изменение химического состава воды хвостохранилища. Продолжается рост минерализации (рис. 2), значения которой к 2015 г. достигли 793 мг/л.

В многолетнем плане отмечается увеличение концентрации всех ионов, особенно К⁺ и SO₄²⁻, но при этом наблюдается слабое снижение содержания гидрокарбонатов (рис. 2). Лабораторными опытами было установлено, что увеличение выщелачивания сульфатов связано с окислением сульфидов, содержащихся в виде примесей в рудах Костомукшского и Корпангского месторождений [Кулакова, Лозовик, 2011]. Известно, что окисление пирита железа сопровождается образованием серной кислоты, в присутствии которой будут

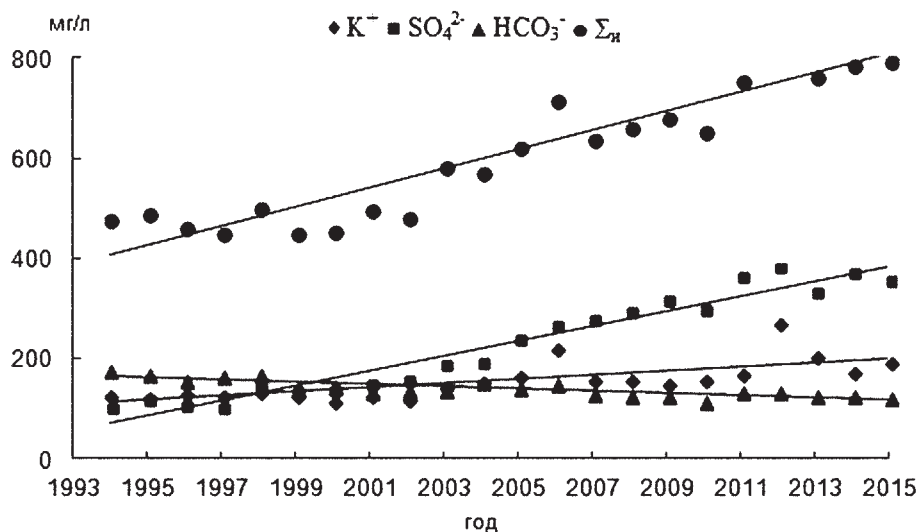


Рис. 2. Многолетняя динамика минерализации, содержания K⁺, SO₄²⁻ и HCO₃⁻ в воде хвостохранилища

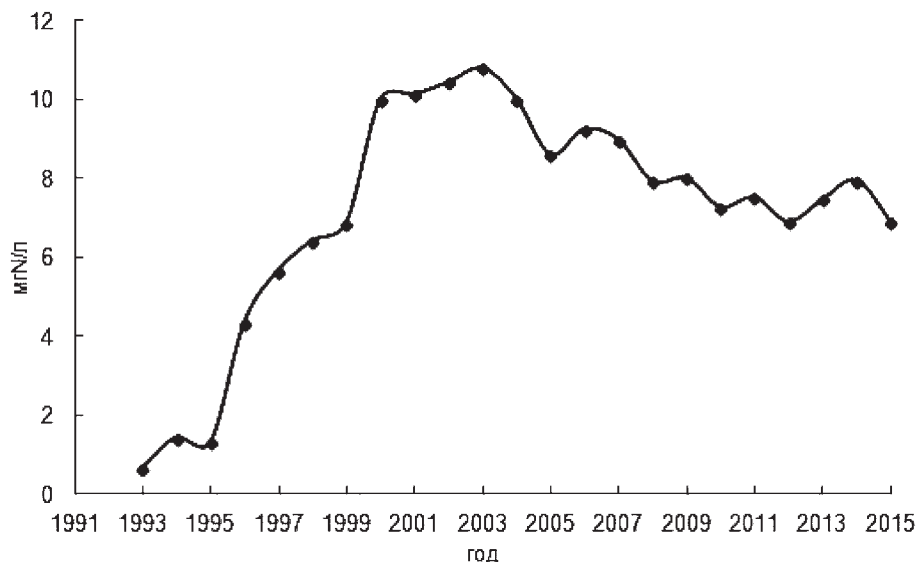


Рис. 3. Многолетнее изменение содержания NO_3^- в воде хвостохранилища

разлагаться гидрокарбонаты. По этой причине и отмечается тренд уменьшения их содержания за последние десятилетия.

В связи с постоянным увеличением содержания калия и сульфатов в воде хвостохранилища произошли изменения в ионном составе, и она стала соответствовать сульфатному классу группы калия. Соотношение ионов щелочных металлов и щелочно-земельных к щелочным остается аномальным, как и на начальном этапе эксплуатации хвостохранилища, сохраняется на одном уровне и в среднем составляет 0,19 и 0,63 соответственно.

В период 1994–2002 гг. наблюдалось увеличение содержания нитратов, а в последующие годы оно стабилизировалось, и с 2004 г. наметилась тенденция его снижения (рис. 3). Содержа-

ние аммония в воде хвостохранилища низкое (средняя концентрация за весь рассматриваемый период составляет 0,06 мгN/л), несмотря на высокое его поступление с рудничными водами. По-видимому, происходит частичное улетучивание NH_3 из воды хвостохранилища, имеющей слабощелочную реакцию среды, а также его превращение в другие формы азота в результате протекания микробиологических процессов.

Содержание железа и кремния в рассматриваемый период было достаточно стабильным. Средняя концентрация $\text{Fe}_{\text{общ}}$ невысокая (0,25 мг/л), и она ниже, чем среднерегиональный фон, характерный для поверхностных вод Карелии (0,43 мг/л) [Лозовик, 2006]. Содержание кремния находится на уровне региональных природных величин и составляет в среднем 2,4 мг/л.

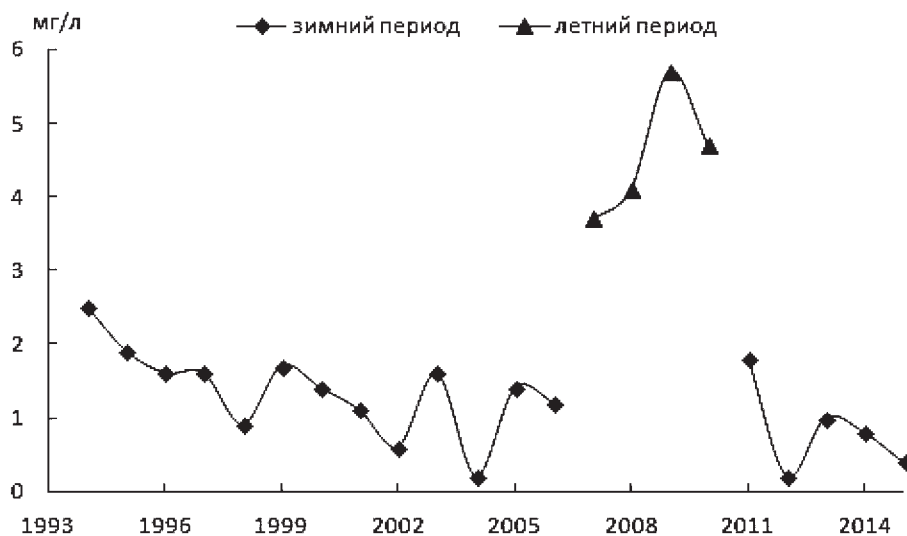


Рис. 4. Изменение содержания взвешенного вещества в поверхностном горизонте воды хвостохранилища в зимний и летний периоды

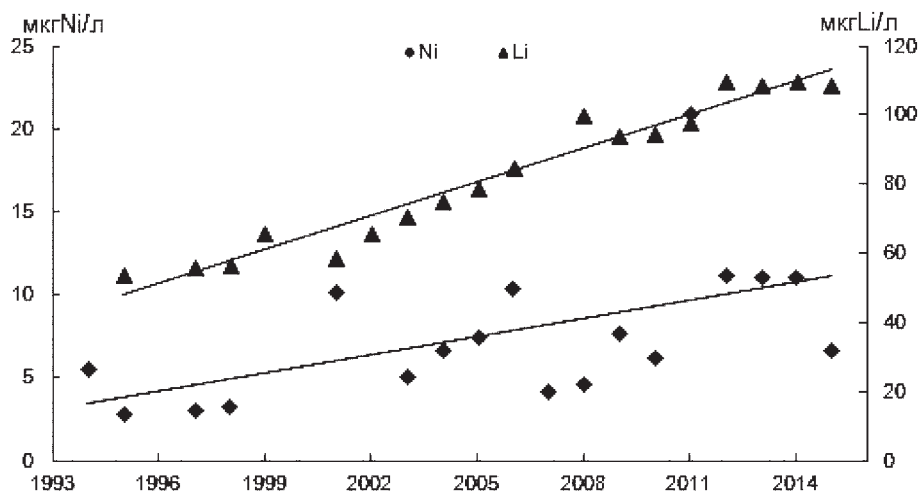


Рис. 5. Содержание лития и никеля в воде хвостохранилища в 1994–2015 гг.

Что касается органического вещества, то его содержание к настоящему времени существенно снизилось по сравнению с предыдущим периодом, судя по величине его косвенных показателей. Так, перманганатная окисляемость и цветность в 2015 г. составили 0,9 мгО/л и 4 град. против 3,2 и 29 в 1993 г. соответственно.

Содержание взвешенного вещества достаточно стабильное в зимний период и в среднем составляет 1,2 мг/л (рис. 4). В летний период 2007–2010 гг. наблюдалось повышение концентрации взвешенных веществ в среднем до 4,6 мг/л за счет гидродинамических процессов.

По сравнению с бессбросовым периодом эксплуатации хвостохранилища в 1995–2014 гг. отмечается тренд роста содержания лития (от 55 мкг/л в 1995 г. до 110 мкг/л в 2014 г.) и в меньшей степени никеля – в пределах 5–21 мкг/л (рис. 5). Содержание других микроэлементов (Cr, Cu) находится на уровне региональных фоновых величин.

Таким образом, в последнее десятилетие в воде хвостохранилища отмечается стабилизация ряда химических показателей (содержания нитратов, железа, взвешенных веществ и никеля), но продолжают расти концентрации калия, сульфатов и лития, а также наблюдается увеличение минерализации воды и уменьшение ее щелочности. Такая тенденция связана с многократным использованием воды хвостохранилища для водоснабжения комбината.

Изменение химического состава воды системы р. Кенти в многолетнем плане

Анализ многолетних данных показал, что с вводом в эксплуатацию Костомукшского ГОК произошли существенные изменения

и в химическом составе воды озера системы р. Кенти (табл. 5, 6). В период бессбросового режима эксплуатации хвостохранилища основное антропогенное влияние приходилось на оз. Окунево в результате поступления фильтрационных вод. Это отразилось в основном на повышении содержания минеральных компонентов, и в первую очередь ионов калия. К 1993 г. $\Sigma_{и}$ в воде оз. Окунево достигла 360 мг/л. При этом снизилось содержание ОВ и возросло значение рН (7,4). В озерах Поппаллярви и Койвас также произошло увеличение минерализации, но в меньшей степени, чем в оз. Окунево. Водные объекты, расположенные ниже оз. Койвас, находились в состоянии, близком к естественному.

Начиная с 1994 г. основное антропогенное воздействие на систему р. Кенти стали оказывать попуски воды из хвостохранилища. К источникам техногенного влияния также можно отнести воды северо-западного канала, принимающего сток с отвалов вскрышных пород, а в последнее время и рудничные воды с Корпангского месторождения, которые поступают по Безымянному ручью в р. Корпангийоки, приток оз. Койвас. Определенный вклад в загрязнение системы вносит и южный канал.

Техногенное воздействие ограничивается системой р. Кенти и, благодаря значительному разбавлению вод в устье р. Кенти водами, поступающими из оз. Верхнее Куйто, почти не затрагивает оз. Среднее Куйто, поэтому ионный состав его воды не отличается от природного. Среднегодовой расход воды в устье р. Кенти составляет 263,1 млн м³/год, а с учетом стока из оз. В. Куйто – 352 млн м³/год.

Поступление техногенных вод при попусках воды из хвостохранилища в еще большей степени отразилось на минерализации воды и ее

Таблица 5. Некоторые показатели химического состава воды системы р. Кенти при ее естественном состоянии (1977–1978 гг.) и при бес сбросовом режиме эксплуатации хвостохранилища (1993 г.)

Озеро	1977–1978 гг.					1993 г.				
	K ⁺ +Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Σ _и	NO ₃ ⁻ , мгN/л	pH	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Σ _и	NO ₃ ⁻ , мгN/л	pH
	мг/л					мг/л				
Окуневое	1,2	5,3	24,5	<0,01	6,6	49	153	361	0,32	7,4
Поппаллярви	2,0	7,0	23,7	<0,01	6,6	11	43	99	0,33	7,2
Койвас	2,4	5,7	20,3	<0,01	6,6	4	9	32	0,02	7,0
Кенто	2,1	5,5	18,3	-	6,6					
Ср. Куйто	-	-	21,3*	0,1*	6,0–6,98*					

Примечание. Здесь и в табл. 6: *данные 1982–1983 гг. Прочерк – нет данных.

Таблица 6. Косвенные показатели содержания органического вещества в водоемах системы р. Кенти и оз. Среднее Куйто при их естественном состоянии (1977–1978 гг.) и при бес сбросовом режиме эксплуатации хвостохранилища (1993 г.)

Озеро	1977–1978 гг.				1993 г.		
	ПО	ХПК	БПК ₅ , мгO ₂ /л	ЦВ, град.	ПО	БПК ₅ , мгO ₂ /л	ЦВ, град.
	мгO/л				мгO/л		
Окуневое	10,9	19,8	0,7	51	11,2	0,6	64
Поппалярви	12,0	20,4	0,8	48	12,2	0,9	71
Койвас	10,0	17,3	0,9	39	10,1	0,8	48
Кенто	10,7	17,6	1,0	35			
Ср. Куйто	8,8*	18,7*	0,6*	44*			

ионном составе, чем это было до 1994 г. Так, Σ_и в среднем (по данным 2001–2015 гг.) изменяется в пределах от 485 в оз. Окуневом до 121 мг/л в оз. Кенто, и только в оз. Ср. Куйто ее значение больше соответствует фоновым (25 мг/л).

В многолетнем плане наблюдается тренд роста минерализации воды системы р. Кенти (рис. 6). При этом соотношение главных ионов меняется мало в связи с тем, что воды системы разбавляются приточными водами с низкими

концентрациями веществ в них. Вода верхних озер (Окуневое, Поппалярви) относится к сульфатно-калиевому типу, а нижних (Койвас, Кенто) – к сульфатно-калиево-кальциевому. Вода оз. Ср. Куйто вблизи устья р. Кенти соответствует гидрокарбонатному классу группы кальция, магния, т. е. природному типу вод. Поступление вод из В. Куйто способствует разбавлению вод р. Кенти, что сказывается на минерализации воды (существенное ее снижение) и на соотношении ионов.

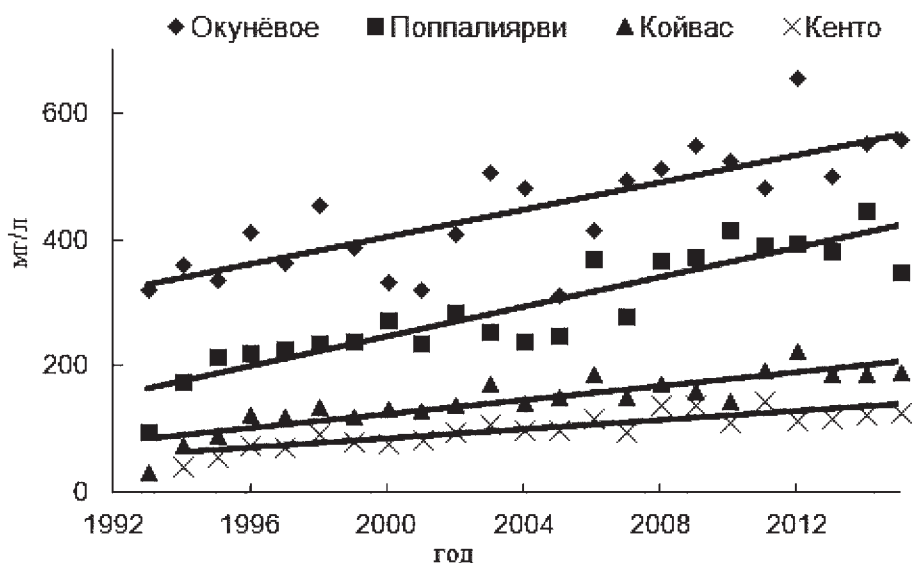


Рис. 6. Многолетняя динамика Σ_и в водоемах системы р. Кенти

Таблица 7. Органическое и взвешенное вещество, pH, O₂ и CO₂ в водоемах системы р. Кенти в летний период 2010 г.

Озеро	ЦВ, град.	ПО, мгО/л	БПК ₅ , мгО ₂ /л	O ₂ , % насыщ. (пов./дно)	CO ₂ , мг/л (пов./дно)	pH (пов./дно)	Взв. в-во, мг/л
Окуневое	8	4,2	1,4	93/98	0/0,2	8,0/8,3	2,0
Поппалиярви	12	4,6	0,8	90/98	1,1/1,4	8,0/7,8	1,9
Койвас	20	6,0	0,4	84/84	3,4	7,1/7,5	1,7
Кенто	27	7,6	0,6	84/78	4,3	7,3/7,4	1,8
Ср. Куйто	30	7,7	0,6	84/84	3,5/4,0	6,9/6,8	1,9

Таблица 8. Органическое и взвешенное вещество, pH, O₂ и CO₂ в водоемах системы р. Кенти в зимний период 2014 г.

Озеро	ЦВ, град. Pt-Co шк.	БПК ₅ , мгО ₂ /л	ПО, мгО/л	O ₂ , % насыщ.	CO ₂ , мг/л	pH	Взв. в-во, мг/л
Окуневое (пов.)	70	0,9	7,3	91	5,2	7,4	1,0
Окуневое (5,0 м)	< 5	1,1	1,4	93	1,3	7,6	0,6
Поппалиярви (пов.)	44	0,7	8,1	73	9,1	7,3	0,6
Поппалиярви (7,0 м)	32	0,6	6,0	78	7,4	7,4	0,8
Койвас (пов.)	74	0,7	13,3	71	10,6	7,3	0,3
Койвас (11,0 м)	30	0,8	7,4	60	13,2	7,1	0,6
Кенто (пов.)	120	1,4	16,1	73	15,2	6,5	1,3
Кенто (15,0 м)	20	0,9	6,8	50	11,1	7,0	0,4
Ср. Куйто (пов.)	33	0,7	8,6	79	4,7	9,9	0,6
Ср. Куйто (10,0 м)	28	0,6	7,5	76	5,0	6,8	0,8

Если сравнить ионный состав воды озер системы р. Кенти со средневзвешенным техногенных вод, то можно констатировать, что воды озер Койвас и Кенто почти в точности соответствуют по средневзвешенному соотношению ионов техногенным водам. Верхние озера отличаются от последних повышенной эквивалентной долей K⁺. Озера Окуневое и Поппалиярви находятся под прямым влиянием попусков воды из хвостохранилища в связи с их малыми размерами и небольшим притоком с водосбора. Нижние озера, как более крупные, с учетом их замедленного водообмена по сравнению с верхними обладают большей консервативностью к изменению ионного состава воды.

Высокие концентрации ионов калия в водоемах обуславливают аномальное соотношение щелочных металлов и щелочно-земельных к щелочным, которое к настоящему времени выровнялось по системе и в среднем (за последние 10 лет) составляет 0,29 и 1,12 соответственно.

Анализируя многолетнюю динамику содержания K⁺ и SO₄²⁻ в воде системы р. Кенти, следует отметить тренд его увеличения по всем озерам системы.

Низкое содержание ОВ наблюдается в верхних озерах – приемниках техногенных вод, в нижних – сказывается влияние боковых притоков, и кон-

центрации ОВ выше (табл. 7, 8). В природном состоянии картина была другой. В верхних озерах, как более проточных, концентрация ОВ была выше, чем в нижних. Насыщение воды кислородом изменяется в пределах 78–98 %, концентрация CO₂ – 0,1–4,3 мг/л, взвешенных веществ – 1,7–2,0 мг/л в период открытой воды, а зимой – 50–93 %, 5,0–15,3 и до 1,3 мг/л соответственно. Значения pH колеблются от 8,3 в оз. Окуневом до 7,4 в оз. Кенто в период открытой воды, а в зимний период их величины ниже – 7,6 и 6,5 соответственно. Полученные данные по содержанию O₂, CO₂ и взвеси свидетельствуют, что попуски воды из хвостохранилища несущественно сказываются на газовом режиме водоемов и содержании взвешенных веществ. В то же время попуски способствуют повышению pH воды, но его величины находятся в пределах биологического оптимума pH (6,5–8,5).

В зимний период по всем водоемам системы отмечается стратификация химического состава воды, что связано с большим распространением техногенных вод, как более тяжелых, в придонных слоях, а речных вод с водосбора, как более легких, – в поверхностных. Так, цветность воды в оз. Окуневом у дна была <5 град., а на поверхности – 70, в оз. Кенто – 20 и 120 град. соответственно. Кроме того, поверхностные слои воды системы р. Кенти отличаются

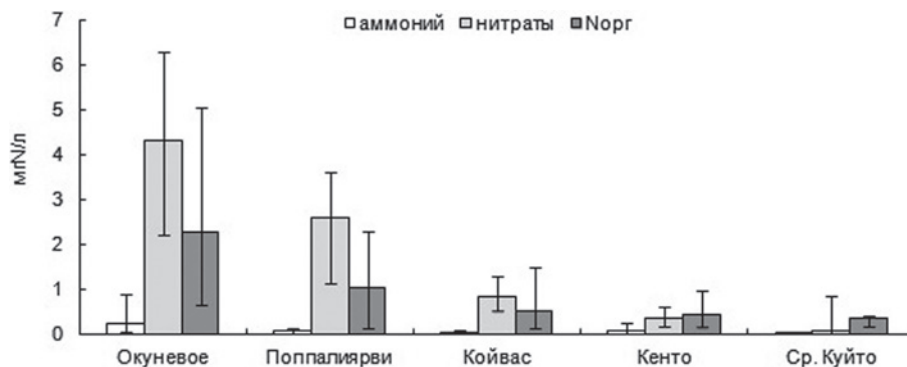


Рис. 7. Концентрация азотсодержащих соединений в водоемах системы р. Кенти и оз. Среднее Куйто (2001–2015 гг.)

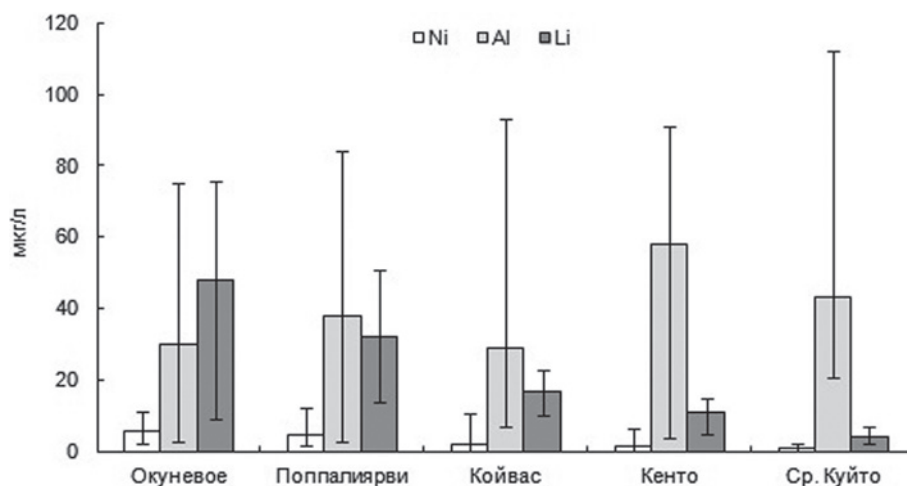


Рис. 8. Содержание микроэлементов в системе р. Кенти и оз. Среднее Куйто (2001–2015 гг.)

большими величинами ПО (6,0–16,1 мгО/л), тогда как в придонных эти значения снижаются и могут достигать 1,4 мгО/л, как это имело место в оз. Окуновое.

Вторым последствием техногенного влияния является азотное загрязнение системы р. Кенти. Анализ среднемноголетнего содержания нитратов позволил выявить закономерное уменьшение их концентраций от верхних озер системы к нижним (рис. 7). Среди азотсодержащих веществ NO_3^- являются доминирующими, и только к нижнему течению р. Кенти и в оз. Ср. Куйто на первое место выходит $\text{N}_{\text{орг}}$, что является типичным для поверхностных вод Карелии. Следует отметить, что в самой системе содержание NH_4^+ и NO_2^- достаточно низкое. Вода реки хорошо насыщена кислородом, и процессы нитрификации в ней идут как в природных водах, без каких-либо отклонений.

Следует отметить, что в многолетнем плане содержание нитратов в воде верхних озер (Окуновое, Поппаллярви) системы р. Кенти имеет тенденцию роста, тогда как в нижних (Койвас, Кенто) оно относительно стабильно.

Микроэлементный состав, за исключением лития и никеля, полностью соответствует природным фоновым показателям. Концентрации Li и Ni закономерно уменьшаются от верхних озер к нижним за счет разбавления приточными водами, а концентрация алюминия – напротив, растет (рис. 8). Последнее связано с его большим поступлением с приточными водами, имеющими слабокислую реакцию среды.

Анализируя многолетнюю динамику содержания Li и Ni в системе р. Кенти (рис. 9), следует отметить тренд увеличения концентрации Li по всем озерам, тогда как концентрация Ni изменяется в меньшей степени.

Таким образом, попуски воды из хвостохранилища привели к еще большим изменениям химического состава воды системы р. Кенти, и наиболее существенно это отразилось на величине минерализации, содержании калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля. Техногенное влияние закономерно уменьшается к устью р. Кенти за счет боковой приточности и мало проявляется в оз. Ср. Куйто.

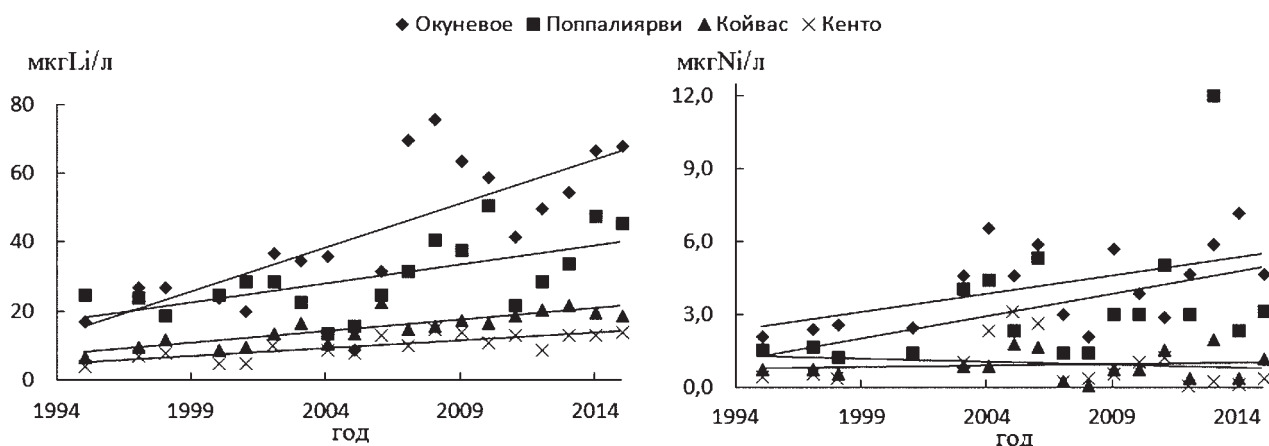


Рис. 9. Многолетняя динамика содержания Li и Ni в водоемах системы р. Кенти

Характеристика загрязненности водоемов системы р. Кенти и оз. Среднее Куйто

На основании анализа многолетней изменчивости химического состава воды хвостохранилища и системы р. Кенти установлено, что показателями, в наибольшей степени отражающими антропогенное влияние Костомукшского ГОК, являются величина минерализации воды, соотношение главных катионов, содержание K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ni и Li.

С использованием приоритетных показателей загрязнения воды (K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Li, Ni) проведена оценка загрязненности хвостохранилища, системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто путем расчета индекса загрязнения воды с использованием общероссийских ПДК (ИЗВ) и региональных ПДК (ИЗВ_{рег}) [Лозовик, Кулакова, 2014] согласно методическим рекомендациям [Временные..., 1986]. Расчет ИЗВ выполнялся по следующей формуле: $ИЗВ = 1/n \sum \frac{C_i}{ПДК_i}$, где C_i – концентрация i -го компонента, $ПДК_i$ – предельно допустимая концентрация i -го компонента, n – количество показателей.

Наряду с ИЗВ был выполнен расчет ИЗВ_{рег}, который осуществлялся по аналогичной формуле, но с использованием региональных предельно допустимых концентраций (РПДК). В РПДК учитывается не только ПДК, но и региональный геохимический фон элементов [Лозовик, Платонов, 2005]. В качестве ПДК элементов использовались следующие значения: K^+ – 50 мг/л, SO_4^{2-} – 100 мг/л, NO_3^- – 9,1 мгN/л, Li – 80 мкг/л, Ni – 10 мкг/л [Перечень..., 1999]. РПДК рассчитывалось как среднегеометрическое значение ПДК элемента и его фоновой концентрации. Значения РПДК для вышеуказанных веществ составляют: K^+ –

5 мг/л, SO_4^{2-} – 16 мг/л, NO_3^- – 0,3 мгN/л, Li – 6,3 мкг/л, Ni – 2,2 мкг/л.

Дополнительно к расчету ИЗВ выполнялись вычисления комбинаторного индекса загрязненности (КИЗВ) и удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), а также количества показателей, по которым наблюдается наибольшая степень загрязненности воды (КПЗ), алгоритм их расчета предложен в РД 52.24.643–2002. Расчет комбинаторных индексов производился по содержанию O_2 , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Ni, $Fe_{общ}$, Mn, Li, Al, Cu и величине БПК₅.

Расчет индексов загрязненности произведен для различных периодов: 1995 г. – когда начались пуски воды из хвостохранилища в систему р. Кенти, а также 2011–2015 гг. (КИЗВ, УКИЗВ), 2015 г. – ИЗВ и ИЗВ_{рег}.

По ИЗВ (табл. 9), полученным для 1995 г., к категории «чистых» относятся хвостохранилище и все водоемы системы р. Кенти, за исключением оз. Кенто, которое, как и оз. Ср. Куйто, – «очень чистое».

По региональным ПДК картина загрязненности иная. Хвостохранилище являлось «очень грязным», оз. Окуневое, Поппалярви – «грязное», оз. Койвас – «умеренно загрязненное», оз. Кенто, Ср. Куйто – «чистое». В 2015 г. загрязненность водоемов изменилась. Согласно полученным ИЗВ, хвостохранилище, озера Окуневое и Кенто превратились в «умеренно загрязненные», тогда как озера Поппалярви, Койвас и Ср. Куйто сохранили свой статус. По региональным ПДК хвостохранилище и оз. Окуневое стали «чрезвычайно грязными», оз. Поппалярви – «очень грязным», Койвас, Кенто – «загрязненными», а оз. Ср. Куйто сохранило свою категорию «чистого» водоема.

Полученные КИЗВ и УКИЗВ (табл. 9) также отражают закономерное изменение

Таблица 9. ИЗВ, ИЗВ_{пер}, КИЗВ и УКИЗВ хвостохранилища, системы р. Кенти и оз. Среднее Куйто в разные годы

Объект	ИЗВ	ИЗВ _{пер}	КИЗВ	УКИЗВ	КПЗ
	1995 г.				
Хвостохранилище	0,9	9,6	36,8	2,8	2 (Fe, Al)
Оз. Окуневое	0,5	4,4	25,8	2,0	2 (Fe, Mn)
Оз. Поппалиярви	0,5	4,9	21,4	1,6	0
Оз. Койвас	0,2	1,7	16,4	1,3	0
Оз. Кенто	0,1	0,8	20,8	1,6	1 (Mn)
Оз. Ср. Куйто	0,04	0,2	8,0	0,6	0
	2015 г.		2011–2015 гг.		
Хвостохранилище	1,7	17,1	67,7	4,8	3 (Fe, Mn, Cu)
Оз. Окуневое	1,4	13,7	48,4	3,5	3 (Fe, Mn, Cu)
Оз. Поппалиярви	0,9	9,1	46,2	3,3	3 (Fe, Mn, Cu)
Оз. Койвас	0,4	4,0	29,6	2,1	2 (Mn, Cu)
Оз. Кенто	1,3	2,4	36,8	2,6	3 (Fe, Mn, Cu)
Оз. Ср. Куйто	0,1	0,4	28,8	2,1	2 (Mn, Cu)

загрязненности хвостохранилища и водоемов системы р. Кенти в многолетнем плане. В 1995 г. хвостохранилище относилось к категории «загрязненное», водоемы системы р. Кенти являлись «слабо загрязненными», а оз. Ср. Куйто было «условно чистое», тогда как к 2015 г. хвостохранилище стало характеризоваться как «грязное», оз. Окуневое, Поппалиярви – «очень загрязненное», оз. Койвас, Кенто и даже Ср. Куйто – «загрязненное». Среди КПЗ в водоемах в основном выявлены Fe, Mn и Cu, отражающие региональную специфику вод, а не их загрязнение.

Заключение

Анализ многолетних гидрохимических материалов (1970–2015 гг.) показал, что в результате функционирования Костомукшского ГОК произошли существенные изменения в химическом составе воды его хвостохранилища и системы р. Кенти по сравнению с природным состоянием.

В воде хвостохранилища увеличилось содержание большинства минеральных компонентов, особенно K^+ , SO_4^{2-} , а также NO_3^- , наблюдаются низкие концентрации Fe, Mn, Al, NH_4^+ , но повышенные Li и Ni. В то же время отмечается тенденция уменьшения концентрации HCO_3^- .

Наибольшее воздействие на систему р. Кенти оказывают попуски воды из хвостохранилища, которые осуществляются с 1994 г. в среднегодовом объеме 13,1 млн м³/год, что привело к росту величины минерализации, содержания калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля по всем водоемам системы. По системе р. Кенти от верхних озер к нижним

отмечается закономерное снижение всех показателей за счет разбавления, тогда как концентрация алюминия, напротив, возрастает, и это связано с его поступлением с водосборной территории с приточными водами, имеющими слабокислую реакцию среды. В то же время по сравнению с природным состоянием уменьшилось содержание ОВ в связи с низким их количеством в техногенных водах. Следует отметить, что антропогенное влияние фактически не затрагивает оз. Среднее Куйто благодаря большому разбавляющему эффекту вод, поступающих в устье р. Кенти из оз. Верхнее Куйто.

Оценка загрязненности хвостохранилища и водоемов системы р. Кенти, выполненная для различных периодов функционирования комбината, показала ее возрастание в многолетнем плане. Результаты расчетов индексов загрязненности воды по региональным ПДК дали высокую степень загрязнения хвостохранилища и верхних озер системы (до уровня «чрезвычайно грязных») и более низкую – нижних (в пределах «загрязненных»). Согласно расчетам КИЗВ и УКИЗВ по РД 52.24.643–2002 выявлено наибольшее загрязнение вод Fe, Mn и Cu, но оно не связано с антропогенным влиянием, а отражает региональную специфику вод.

Авторы выражают глубокую благодарность к. т. н. М. Б. Зобкову и М. В. Калмыкову за помощь в сборе гидрохимического материала.

Литература

Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти / Под

ред. В. И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. 100 с.

Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250–1163. М., 1986. 5 с.

Дубровина Л. В., Калинин Н. М., Лозовик П. А. Факторы токсичности для гидробионтов техногенных вод Костомукшского ГОКа // Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. С. 15–25.

Кулакова Н. Е., Лозовик П. А. Экспериментальное выщелачивание руды Костомукшского и Корпангского железорудных месторождений // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 98–102.

Кулакова Н. Е., Лозовик П. А. Анализ влияния Костомукшского горно-обогатительного комбината на окружающую среду с учетом природно-техногенных факторов формирования и трансформации вод // Вода: химия и экология. 2012. № 2. С. 18–25.

Лозовик П. А., Платонов А. В. Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. 2005. № 6. С. 527–532.

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

Лозовик П. А., Калмыков М. В., Дубровина Л. В. Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав техногенных вод // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 100–106.

Лозовик П. А., Калмыков М. В. Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды озерно-речной системы р. Кенти // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 106–112.

Лозовик П. А., Калмыков М. В., Кулакова Н. Е. Многолетняя динамика изменения режима системы р. Кенти под влиянием техногенных вод Костомукшского ГОКа // Материалы III Всероссийской конференции «Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения». Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Часть 1. С. 203–208.

Лозовик П. А., Кулакова Н. Е. Методические подходы к оценке водных объектов в зоне действия предприятий горнодобывающей промышленности // Водные ресурсы. 2014. № 4. С. 429–438. doi: 10.7868/S0321059614040117

Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 66 с.

Морозов А. К. Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга

1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. С. 129–133.

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

Пальшин Н. И., Сало Ю. А., Кухарев В. И. Влияние Костомукшского ГОКа на экосистему р. Кенти. Гидрологические и гидрохимические аспекты // Исследование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря (в границах Карелии). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. С. 140–161.

Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 303 с.

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. 165 с.

РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / Росгидромет. Ростов-на-Дону, 2002. 50 с.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Ред. Л. В. Боевой. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. Часть 1. 1044 с.

Феоктистов В. М., Ипатов Р. Г. О химическом составе воды верхнего участка системы р. Кенти // Исследование некоторых элементов экосистемы Белого моря и его бассейна: опер.-информ. материалы. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1985. С. 45–47.

Феоктистов В. М., Морозов А. К. О содержании микроэлементов в водотоках Костомукшского железорудного месторождения // Исследование некоторых элементов экосистемы Белого моря и его бассейна: опер.-информ. материалы. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1985. С. 48–50.

Феоктистов В. М., Сало Ю. А. Режим эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОКа. Практические рекомендации. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1990. 42 с.

Феоктистов В. М., Тимакова Т. М., Калугин А. И. Влияние Костомукшского ГОКа на водную систему Кенти – Кенто // Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 63–78.

Харкевич Н. С., Фрейндлинг В. А., Басов М. И. Современный гидрологический и гидрохимический режим вод бассейна р. Кенти: опер.-информ. материалы. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1980. С. 25–28.

Харкевич Н. С., Митина И. Ф. Об изменениях в химическом составе воды озер бассейна р. Кенти в связи с антропогенным воздействием // Исследования Онежской губы и водоемов бассейна Белого моря: опер.-информ. материалы. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1984. С. 20–22.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn // Norwegian Institute for Water Research, Oslo. September 2015. 86 p.

Поступила в редакцию 11.02.2016

References

- Dubrovina L. V., Kalinkina N. M., Lozovik P. A. Faktory toksichnosti dlya gidrobiontov tekhnogennyh vod Kostomukshskogo GOKa [Potential toxic factors of wastewater from the Kostomuksha iron-ore mining and concentration mill for aquatic organisms]. Vliyanie tekhnogennyh vod gorno-obogatitel'nogo kombinata na vodoemy sistemy reki Kenti [The effect of wastewater from iron-ore mining and concentration mill on water bodies of the Kenti River system]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1995. P. 15–25.
- Feoktistov V. M., Ipatova R. G. O himicheskom sostave vody verhnego uchastka sistemy r. Kenti [On the chemical composition of water in the upper Kenti River system]. Issledovanie nekotoryh elementov ekosistemy Belogo morya i ego bassejna. Oper.-inform. materialy [Study of some elements of the ecosystem of the White Sea and its basin. Substantive information materials]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1985. P. 45–47.
- Feoktistov V. M., Morozov A. K. O sodержanii mikroelementov v vodotokah Kostomukshskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Trace element content in the watercourses of the Kostomuksha iron-ore deposit]. Issledovanie nekotoryh elementov ekosistemy Belogo morya i ego bassejna: oper.-inform. materialy [Study of some elements of the ecosystem of the White Sea and its basin. Substantive information materials]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1985. P. 48–50.
- Feoktistov V. M., Salo Yu. A. Rezhim ehkspluatatsii hvostohranilishcha Kostomukshskogo GOKa. Prakticheskie rekomendatsii [Operational mode of tailings pond of the Kostomuksha mining and processing plant. Practical recommendations]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1990. 42 p.
- Feoktistov V. M., Timakova T. M., Kalugin A. I. Vliyanie Kostomukshskogo GOKa na vodnyu sistemu Kenti – Kento [The effect of the Kostomuksha iron-ore mining and concentration mill on the Kenti-Kento system]. Vodnye resursy Karelii i ekologiya [Karelian water resources and ecology]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1992. P. 63–78.
- Harkevich N. S., Frejndling V. A., Basov M. I. Sovremennyy gidrologicheskij i gidrohimicheskij rezhim vod bassejna r. Kenti: oper.-inform. materialy [Current hydrological and hydrochemical condition of the Kenti River basin. Express information materials]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1980. P. 25–28.
- Harkevich N. S., Mitina I. F. Ob izmeneniyah v himicheskom sostave vody ozer bassejna r. Kenti v svyazi s antropogennym vozdejstviem [On changes in chemical composition of water in the lakes of the Kenti River basin under anthropogenic load]. Issledovaniya Onezhskoj guby i vodoemov bassejna Belogo morya: oper.-inform. materialy [Studies of Onega Bay and water bodies of the White Sea basin. Express information materials]. Petrozavodsk: KF AN SSSR, 1984. P. 20–22.
- Kulakova N. E., Lozovik P. A. Ehksperimental'noe vyshchelachivanie rudy Kostomukshskogo i Korpangskogo zhelezorudnyh mestorozhdenij [Experimental leaching of ore from the Kostomuksha and Korpanga iron ore deposits]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 98–102.
- Kulakova N. E., Lozovik P. A. Analiz vliyaniya Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata na okruzhayushchuyu sredu s uchetom prirodno-tekhnogennyh faktorov formirovaniya i transformatsii vod [Kostomuksha mining and processing plant impact on the environment: natural and man-made factors in the formation and transformation of waters]. Voda: himiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]. 2012. No. 2. P. 18–25.
- Lozovik P. A., Platonov A. V. Opredelenie regional'nyh predel'no dopustimyh koncentracij zagryaznyayushchih veshchestv na primere Karel'skogo gidrograficheskogo rajona [Determination of regional maximum permissible concentrations of pollutants by the example of Karelia hydrographic region]. Geoekologiya [Geoecology]. 2005. No. 6. P. 527–532.
- Lozovik P. A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostoyaniya poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstviyu [Hydrogeochemical criteria of the condition of surface water in the humid zone and its resistance to anthropogenic impact]: Summary of PhD (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.
- Lozovik P. A., Kalmykov M. V., Dubrovina L. V. Vodoemy rajona Kostomukshi. Ozero-rechnaya sistema Kenti. Himicheskij sostav tekhnogennyh vod [Water bodies of the Kostomuksha area. The Kenti lake-river system. Chemical composition of wastewater]. Sostoyanie vodnyh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. [The state of water bodies of the Republic of Karelia by the results of monitoring in 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 100–106.
- Lozovik P. A., Kalmykov M. V. Vodoemy rajona Kostomukshi. Ozero-rechnaya sistema Kenti. Himicheskij sostav vody ozerno-rechnoj sistemy r. Kenti [Water bodies of the Kostomuksha area. The Kenti lake-river system. Chemical composition of water in the lake-river system of the Kenti River]. Sostoyanie vodnyh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. [The state of water bodies of the Republic of Karelia by the results of monitoring in 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 106–112.
- Lozovik P. A., Kalmykov M. V., Kulakova N. E. Mnogoletnyaya dinamika izmeneniya rezhima sistemy r. Kenti pod vliyaniem tekhnogennyh vod Kostomukshskogo GOKa [Long-term dynamics of the Kenti River system regime effected by the wastewater of the Kostomuksha iron-ore mining and concentration mill]. Materialy III Vserossijskoj konferencii “Ehkologicheskie problemy Severnyh regionov i puti ih resheniya” [Proc. 3rd all-Russian conf. “Ecological problems of Northern regions and ways of their solution”]. Apatity: KNC RAN, 2010. Part. 1. P. 203–208.
- Lozovik P. A., Kulakova N. E. Metodicheskie podkhody k otsenke vodnykh ob'ektov v zone deystviya predpriyatii gornodobyvayushchei promyshlennosti [Methodological approaches to pollution assessment in water bodies within the operation zone of mining plants]. Vodnye resursy [Water Resources]. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 464–472. doi: 10.7868/S0321059614040117
- Mezhlaboratornoe slichenie rezul'tatov analiza organicheskogo veshchestva i biogennyh elementov v prirodnyh vodah [Interlaboratory comparison of results of chemical analysis of organic substances and biogenic elements in natural waters]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2015. 66 p.

Morozov A. K. Vodoemy rajona Kostomukshi. Ozero-rechnaya sistema Kenti. Himicheskij sostav vody [Water bodies of the Kostomuksha area. The Kenti lake-river system. Chemical composition of water]. Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg. [Present-day state of water bodies of the Republic of Karelia by the results of monitoring in 1992–1997]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1998. P. 129–133.

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

Pal'shin N. I., Salo Yu. A., Kuharev V. I. Vliyanie Kostomukshskogo GOKa na ekosistemu r. Kenti. Gidrologicheskie i gidrohimicheskie aspekty [The effect of the Kostomuksha iron-ore mining and concentration mill on the ecosystem of the Kenti River. Hydrological and hydrochemical aspects]. Issledovanie i ohrana vodnykh resursov bassejna Belogo morya (v granicah Karelii) [Study and conservation of water resources of the White Sea basin (within the boundaries of Karelia)]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1994. P. 140–161.

Perechen' rybohozyajstvennykh normativov: predel'no dopustimyykh koncentracij (PDK) i orientirovanno bezopasnykh urovnej vozdejstviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh ob'ektov, imeyushchih rybohozyajstvennoe znachenie [Guidelines for fishery regulations: maximum permissible concentrations (MPCs) and approximately safe impact levels (ASILs) of pollutants for water and aquatic objects of fishery importance]. Moscow: VNIRO, 1999. 303 p.

Poverhnostnye vody Kaleval'skogo rajona i territorii Kostomukshi v usloviyah antropogennogo vozdejstviya [Surface waters of the Kalevala and Kostomuksha areas under anthropogenic influence]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2001. 165 p.

RD 52.24.643–2002. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverhnostnykh vod po gidrohimicheskim pokazatelyam [The method for integral assessment of the degree of surface water pollution based on hydrochemical parameters]. Rostov-na-Donu, 2002. 50 p.

Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnykh vod sushi [Guidelines for chemical analysis of surface waters]. Ed. L. V. Boevoy. Rostov-na-Donu: NOK, 2009. 1044 p.

Vliyanie tekhnogennykh vod gorno-obogatitel'nogo kombinata na vodoemy sistemy reki Kenti [The effect of wastewater from the iron-ore mining and concentration mill on water bodies of the Kenti River system]. Ed. V. I. Kuharev. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1995. 100 p.

Vremennyye metodicheskie ukazaniya po kompleksnoj ocenke kachestva poverhnostnykh i morskikh vod [Temporary methodological instructions on integrated assessment of quality of surface and sea waters]. Approved by the USSR Goskomgidromet 22.09.1986 g. № 250–1163. Moscow, 1986. 5 p.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn. Norwegian Institute for Water Research, Oslo. September 2015. 86 p.

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лозовик Петр Александрович

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

Галахина Наталья Евгеньевна

младший научный сотрудник лаб. гидрохимии и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: kulakovanata@mail.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Lozovik, Petr

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

Galahina, Natal'ja

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

УДК 556.114.2: 551.312: 556.555.5

ПОГЛОЩЕНИЕ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА ВЕРХНИМ СЛОЕМ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В МАЛОМ ОЗЕРЕ В КОНЦЕ ПЕРИОДА ЛЕДОСТАВА

**Н. И. Пальшин, Г. Э. Здравеннова, Т. В. Ефремова,
Р. Э. Здравеннов, Г. Г. Гавриленко, С. Р. Богданов,
С. Ю. Волков, А. Ю. Тержевик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В работе приводятся результаты исследования содержания растворенного кислорода вблизи границы вода-донные отложения в малом мезотрофном озере Вендюрском (юг Карелии) в конце периода ледостава. Измерения проводились в апреле 2008 г. на 18 склоновых станциях с глубинами от 2,5 до 9,3 м с преобладанием жидких илистых отложений. Установлено, что вблизи границы с илами содержание растворенного кислорода резко уменьшается, при этом максимальный его градиент достигает 9 (мгО₂/л)/см непосредственно на границе воды и ила. Показано, что скорость потребления кислорода донными отложениями на станциях с глубинами 6–8 м максимальна и в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами. С учетом батиметрической кривой озера оценен объем поглощения растворенного кислорода всей площадью донных отложений. Сопоставление полученных оценок с данными измерений содержания растворенного кислорода в водной толще озера в этот же период позволяет утверждать, что более 60 % его уменьшения на этапе зимней стагнации приходится на поглощение илами и менее 40 % – на деструкцию лабильного органического вещества в водной толще.

Ключевые слова: растворенный кислород; донные отложения; поглощение кислорода; мелководное озеро; период ледостава.

**N. I. Palshin, G. E. Zdrovennova, T. V. Efremova, R. E. Zdrovennov,
G. G. Gavrilenko, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, A. Yu. Terzhevik.
ABSORPTION OF DISSOLVED OXYGEN BY THE UPPER LAYER OF BOTTOM
SEDIMENTS IN A SMALL LAKE DURING LATE WINTER**

The results of measurements of dissolved oxygen in the vicinity of the water-sediment interface in a small mesotrophic Lake Vendyurskoe (Southern Karelia) at the end of the ice-covered period are reported. The measurements were carried out in April 2008 on 18 slope sites (depths from 2.5 m to 9.3 m), with a predominance of water-saturated silt. The content of dissolved oxygen decreased sharply at the contact with silt. The maximum oxygen gradient reached 9 (mgO₂/l)/cm on the silt surface. The rate of oxygen consumption by the sediment was maximal at a depth of 6–8 m. This rate was 1.5 times lower in shallower and deeper areas. The amount of dissolved oxygen absorption by sediments was estimated based on the lake's bathymetric curve. A comparison of our estimates with the measured dissolved oxygen content in the water column suggests that

over 60 % of oxygen reduction is the result of absorption by silt and less than 40 % is due to the destruction of labile organic matter in the water column at the stage of winter stagnation.

Key words: dissolved oxygen; bottom sediments; absorption of dissolved oxygen; shallow lake; ice-covered period.

Введение

Основными факторами, определяющими кислородный режим водоемов суши в подледный период, когда подавлен фотосинтез и минимален газообмен с атмосферой, можно считать поступление кислорода с речными водами и его расход на деструкцию органического вещества (ОВ) в водной толще и потребление донными отложениями. Скорость потребления кислорода (СПК) в водной толще малопроточных озер и водохранилищ зимой определяется температурой воды, содержанием ОВ и растворенного кислорода (РК), а также дефицитом РК; кроме того, важную роль играют погодные условия предледоставного периода [Кременецкая, 2007; Golosov et al., 2007]. СПК характеризуется выраженной пространственно-временной изменчивостью: ее максимум приходится на первые недели зимы и приурочен к придонным слоям глубоководных районов [Тержевик и др., 2010]. Оценки СПК в озерах и водохранилищах умеренной зоны для периода ледостава находятся в одном диапазоне: в центральном районе Можайского водохранилища 0,04–0,07 (мгО₂/л)/сут [Пуклаков и др., 2002], в водах Рыбинского водохранилища – 0,02–0,05 (мгО₂/л)/сут [Романенко, 1967], в оз. Красном – 0,02–0,09 (мгО₂/л)/сут [Стравинская, 1971], в оз. Вендюрском – 0,01–0,1 (мгО₂/л)/сут. СПК на границе с донными отложениями зависит от типа грунта. В частности, исследования на Можайском водохранилище в летний период показали, что для песков, занимающих обычно малые глубины, фактором, определяющим СПК, является содержание ОВ, в то время как для илов, преобладающих в глубоководных частях водоемов, где высока вероятность развития аноксии, решающим фактором выступает содержание РК в придонной воде [Бреховских и др., 2006].

До настоящего времени зимний кислородный режим водоемов суши остается слабоизученной областью лимнологии. Основной целью настоящей работы являлась количественная оценка поглощения растворенного кислорода донными отложениями в течение подледного периода в малом мезотрофном озере.

Материалы и методы

Объект исследования. Озеро Вендюрское расположено в южной части Карелии (62°10'–62°20' с. ш., 33°10'–33°20' в. д.), Россия. Оно относится к классу малых бореальных озер мезотрофного типа. Длина озера 7 км, средняя ширина 1,5 км, площадь 10,5 км², средняя глубина 5,3 м, наибольшая 13,4 м (рис. 1). В донных отложениях в основном доминируют илы коричневой окраски, иногда с примесью песка и руды, а на прибрежных склонах до глубины 1–2 м встречаются преимущественно песчаные грунты. По гранулометрическому составу преобладают мелкоалевритовые илы. Мощность иловой толщи составляет 0,4–0,9 м, а в обособленных углублениях дна превышает метр [Литинская, Поляков, 1975]. Содержание воды в верхнем 10-сантиметровом слое илистых отложений в оз. Вендюрском изменяется от 94 до 97 %, плотность твердой части осадков составляет 1,9–2,0 г/см³ [Malm et al., 19976].

В период открытой воды толща оз. Вендюрского достаточно хорошо насыщена кислородом вследствие периодического перемешивания [Гавриленко и др., 2014]. Во время осенней и весенней гомотермии насыщение водных масс кислородом часто превышает 90 %. С июня по август при жаркой безветренной погоде в озере нередко устанавливается термическая стратификация, при этом в придонных слоях обособленных котловин создаются неблагоприятные кислородные условия с формированием выраженного дефицита [Ефремова и др., 2015]. В предледоставный период при понижении температуры воды на 0,2–0,3 °С за сутки содержание РК в озере увеличивается в среднем на 0,1 мгО₂/л за сутки в соответствии с ростом его растворимости. Ледовый покров обычно устанавливается с середины ноября до середины декабря при температуре водного столба в центральной глубоководной части озера 0,5–1,5 °С [Malm et al., 1997a; Пальшин, 1999; Петров и др., 2006]. К моменту установления льда происходит обогащение воды кислородом до 12–13 мгО₂/л (насыщение 90–98 %).

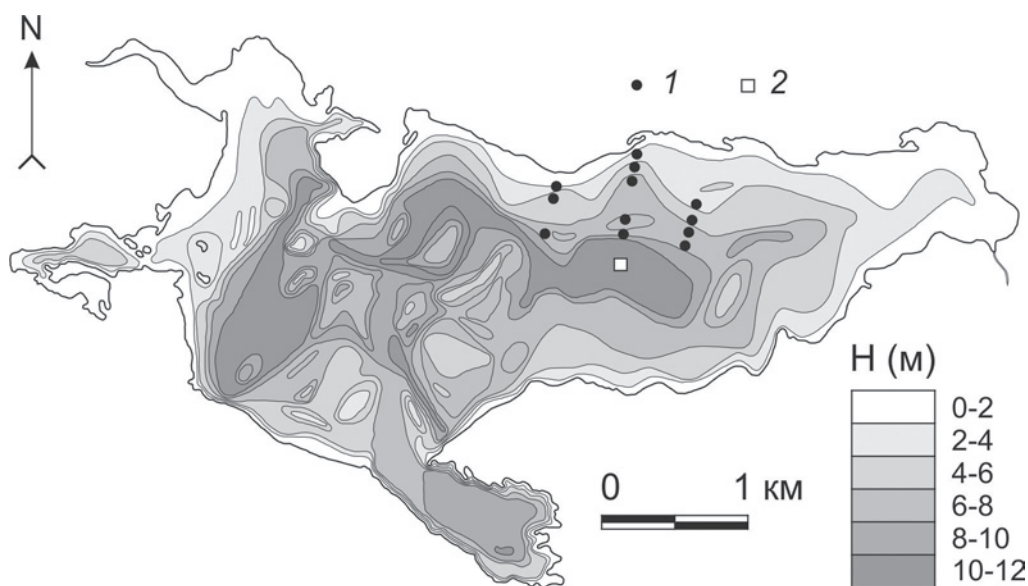


Рис. 1. Батиметрия озера Вендюрского и положение станций измерений концентрации РК с илистыми донными отложениями (1) и термокосы (2)

Кислородный режим озера Вендюрского в период ледостава достаточно подробно изучался в 2002–2013 гг. [Пальшин и др., 2006; Terzhevik et al., 2009; Терзевик и др., 2010]. Было показано, что в течение нескольких суток после установления льда средняя концентрация РК по всей водной толще озера уменьшается на 1,5–2 мгО₂/л в результате того, что снежно-ледяной покров препятствует газообмену водной массы озера с атмосферой, подавляет фотосинтез, а потребление РК на окисление ОВ преобладает над первичной продукцией. Уже через несколько дней ледостава в придонных слоях начинает формироваться стратификация РК. В тонком придонном слое происходит снижение концентрации РК почти до нуля. Со второго месяца ледостава концентрация РК в верхних слоях водной толщи существенно не меняется, а у дна в локальных углублениях повсеместно образуются слои воды с дефицитом кислорода, толщина которых постепенно растет. К началу пятого месяца ледостава верхняя граница градиентного слоя поднимается до глубин 2–4 м. В глубоководной части озера образуется придонная анаэробная зона толщиной до 1,0–1,5 м. При этом горизонтальные неоднородности в распределении РК обычно не превышают 2 мгО₂/л в поверхностном слое по акватории озера, а в тонких придонных слоях (10–20 см) почти на всех склоновых станциях наблюдается существенное уменьшение кислорода.

Методика измерений. Детальные исследования концентрации РК вблизи границы вода-дно были выполнены 17–19 апреля

2008 г. Измерения проводились со льда зондирующим прибором Oxi 340i WTW, Германия (диапазон измерений РК от 0 до 19,99 мгО₂/л, разрешение 0,01 мгО₂/л, точность <2 % от измеренного значения). Для улучшения проникновения датчика в ил он был утяжелен дополнительным грузом, а конец кабеля выправлен, чтобы во время зондирования мембрана датчика (диаметром около 10 мм) располагалась почти параллельно поверхности дна. Это позволяло без существенной погрешности проводить измерения с высоким разрешением по вертикали. При измерениях на станциях высверливались две лунки приблизительно в 1,5 м друг от друга. В одной из них с помощью ручного лота определялась глубина с точностью до 1–2 см и отбиралась проба грунта на визуальный анализ. Измерения РК проводились в соседней лунке. На приборном кабеле изоляцией ставились марки для контроля положения датчика на заданных горизонтах измерений. Для установки датчика кислорода на нужном горизонте применялись две дощечки, уложенные над лункой на лед; между ними пропускался кабель, который фиксировался щипковым (химическим) зажимом. При перемещении датчика на нужный горизонт использовалась плашка, размеры которой соответствовали необходимым вертикальным сдвигам (3×10×50 мм). Для исключения колебаний и возможных возмущений в воде датчик с горизонта на горизонт перемещался плавно только в вертикальном направлении. Наблюдения проводились на 18 склоновых станциях с глубинами от 2,5 до 9,3 м, с шагом по вертикали

1–5 см в придонном слое воды толщиной 20–25 см, а вблизи границы вода-дно (1–2 см выше и ниже поверхности ила) – меньше 1 см. Измерения продолжались до снижения концентрации кислорода меньше 1 мгО₂/л.

При проведении измерений концентраций РК в озере *in situ* трудно точно установить границу воды и донных отложений. В октябре 2007 г. на нескольких станциях были отобраны колонки придонной воды и верхнего слоя донных отложений «стратометром» (рис. 2, а). При проведении измерений в этих колонках можно было визуально проследить положение датчика относительно поверхности дна (рис. 2, б). Измерения концентраций РК вблизи границы с донными отложениями проводились через 2–3 мм. Было установлено, что максимальные градиенты РК

всегда соответствовали непосредственно границе раздела воды и донных отложений. Поэтому в анализе данных апрельских зондирований было принято предположение о том, что граница воды и донных отложений соответствует максимальному значению градиента РК.

С октября 2007 г. по май 2008 г. в центральной глубоководной части озера Вендюрского была установлена коса, оснащенная датчиками температуры и растворенного кислорода с автономными логгерами производства канадской фирмы RBR Ltd (рис. 1). Измерения проводились в водной толще через 1–1,5 м с дискретностью по времени одна минута. По данным косы вычислены среднесуточные концентрации РК на горизонтах (для исключения мелко-масштабных флуктуаций). Учитывая эти данные

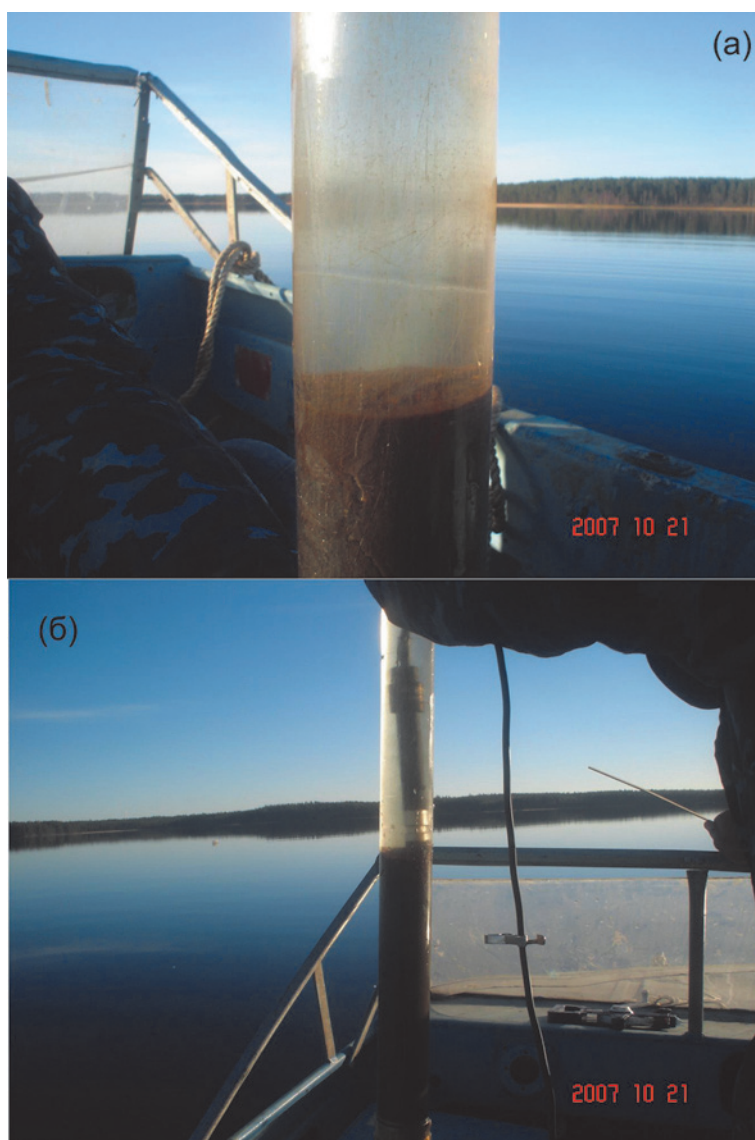


Рис. 2. Колонка надилловой воды и седиментов, отобранная стратометром в октябре 2007 года (а). Измерение концентраций РК вблизи границы вода-дно прибором Oxi 340i WTW (б)

и батиграфическую кривую озера, были выполнены оценки содержания РК и скорости его изменений в объеме всего озера через каждые 30-е сутки зимнего сезона, начиная с третьих суток после образования ледового покрова.

Потребление растворенного кислорода донными отложениями обычно описывают первым законом Фика [Мизандронцев, 1990]:

$$F = D_{эф} \partial C / \partial z, \quad (1)$$

где $D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии, $см^2/сут$, зависящий от температуры и пористости грунтов; C – концентрация РК, $мг/см^3$; z – глубина, $см$.

Коэффициент $D_{эф}$ можно определить как

$$D_{эф} = D_0 \rho^m, \quad 1.3 < m < 3, \quad (2)$$

где D_0 – коэффициент молекулярной диффузии в разбавленном водном растворе при данной температуре; ρ – пористость, соответствует свободному поровому раствору и рассчитывается из весовой влажности и плотности скелета осадков; m – фактор монолитности, в расчетах был принят равным двум. Коэффициенты D_0 рассчитывались по формуле для молекулярной диффузии кислорода в разбавленном водном растворе, приведенной в работе [Мизандронцев, 1990], в зависимости от температуры у дна на каждой станции и динамической вязкости воды. Их изменения составляли от 0,95 до 1,15 $см^2/сут$ при увеличении температуры воды от 0 до 5 °C соответственно. В работе [Lerman, 1979] приводятся отдельные значения коэффициентов, которые лишь на 5 % меньше.

Верхний тонкий слой илов озера Вендюрского насыщен водой больше, чем нижележащие слои, что хорошо видно на фотографии колонки грунта, отобранной стратометром в октябре 2007 г. (рис. 2, а): верхний слой ила – около 1,5 см, светло-коричневой окраски (окисленный) и очень жидкий, ниже ил уплотненный, почти черного цвета. Существенное уплотнение ила наблюдается лишь на глубинах более 20–30 см. Поэтому при расчете пористости седиментов для слоя толщиной меньше одного сантиметра можно с определенной уверенностью принять $\rho = 0,99$ для глубоководных и 0,98 для мелководных станций.

Содержание органических веществ в илистых отложениях определялось по результатам выпаривания и потерь при прокаливании по 10 образцам. Потери при прокаливании составляли в среднем около 30 % от общего веса твердого материала. Одновременно со сжиганием органических веществ происходит разрушение и минеральных веществ, что, по данным П. А. Лозовика [1991], составляет 70 и 30 % соответственно. Таким образом, в твердом материале илистых отложений оз. Вендюрского содержание органических веществ может достигать 20 % и даже быть выше – для самого верхнего слоя седиментов, насыщенного водой на 95–99 %.

Результаты

Анализ данных многочисленных зондирований позволил выделить три основных типа вертикальных профилей РК, которые могут

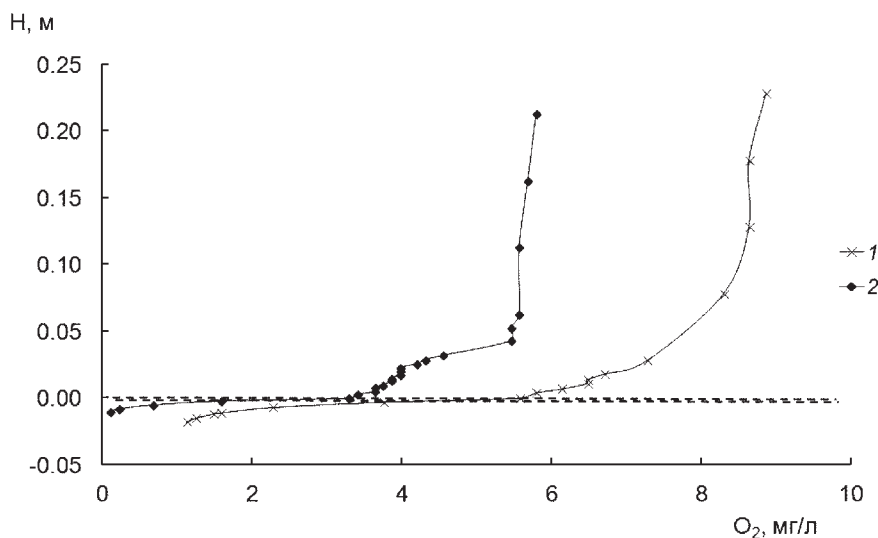


Рис. 3. Концентрация РК в придонном слое воды и верхнем слое ила (апрель 2008 г.) на двух склоновых станциях: 1 – 60 м от берега, глубина 2,5 м; 2 – 300 м от берега, глубина 6,2 м. Маркерами показаны горизонты измерений, горизонтальная пунктирная линия – граница вода-дно

оказывать влияние на диффузионные процессы на границе вода-дно: (1) при плотном грунте (песок, галька), часто встречающемся у берегов и на лудах, и небольшом содержании ОВ на вертикальных профилях кислорода отсутствуют градиенты в придонном слое, то есть поглощение РК поверхностью донных отложений тут минимально; (2) в глубоководной центральной котловине и локальных углублениях кислород к концу зимы в придонной воде отсутствует практически полностью, поэтому градиент кислорода в придонном слое равен нулю; (3) значительная площадь поверхности дна озера представлена склонами различной крутизны с жидкими илистыми отложениями, в придонном слое которых наблюдаются резкие градиенты РК, что является признаком его активного поглощения илами.

В анализе потребления РК поверхностью донных отложений использовались данные с 12 станций, на которых преобладали жидкие илистые отложения (рис. 1), то есть с третьим типом вертикального распределения РК. Данные с мелководных участков с твердым грунтом, как и с участков, относящихся к обособленным углублениям дна, при оценке потоков кислорода в седименты не учитывались. Такие участки дна занимают относительно небольшую площадь по сравнению с площадью склонов.

Анализ вертикальных профилей РК и его градиента показал, что толщина слоя с максимальным градиентом РК не превышает 1–2 см на всех рассмотренных станциях. Выше и ниже величина градиента существенно уменьшается. Типичные профили РК в придонном слое толщиной

около 25 см для двух склоновых станций с мягкими илистыми донными отложениями из разных районов озера (прибрежное мелководье и средние глубины) приведены на рисунке 3.

На станциях с глубинами менее 5 м концентрация РК в верхней части придонного пограничного слоя (10–20 см выше поверхности дна) составляла 6–9 мгО₂/л. Вертикальный градиент РК в тонком слое (2–4 мм) вблизи границы вода-дно и самой верхней части ила достигал 6–7 (мгО₂/л)/см и изменялся мало без определенной зависимости от концентрации РК или температуры воды. На станциях с глубинами от 5 до 7 м в зоне контакта воды и донных отложений наблюдался рост градиента кислорода до 9 (мгО₂/л)/см, что происходило в результате уменьшения толщины слоя ила, в котором присутствовал кислород. На станциях с глубинами больше 8 м концентрация РК в верхней части придонного пограничного слоя была меньше 5 мгО₂/л, и одновременно резко уменьшался градиент кислорода у поверхности дна. В анаэробной зоне озера ниже 10 м градиент кислорода на дне соответственно был равен нулю.

На рисунке 4 приведены скорости потребления РК верхним тонким слоем ила, оцененные по формулам (1) и (2), для 12 склоновых станций с разными глубинами. Максимальная скорость потребления кислорода илистыми донными отложениями отмечается на станциях с глубинами 6–8 м, где она в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами.

С учетом батиметрической кривой озера нами был оценен объем поглощения кислорода

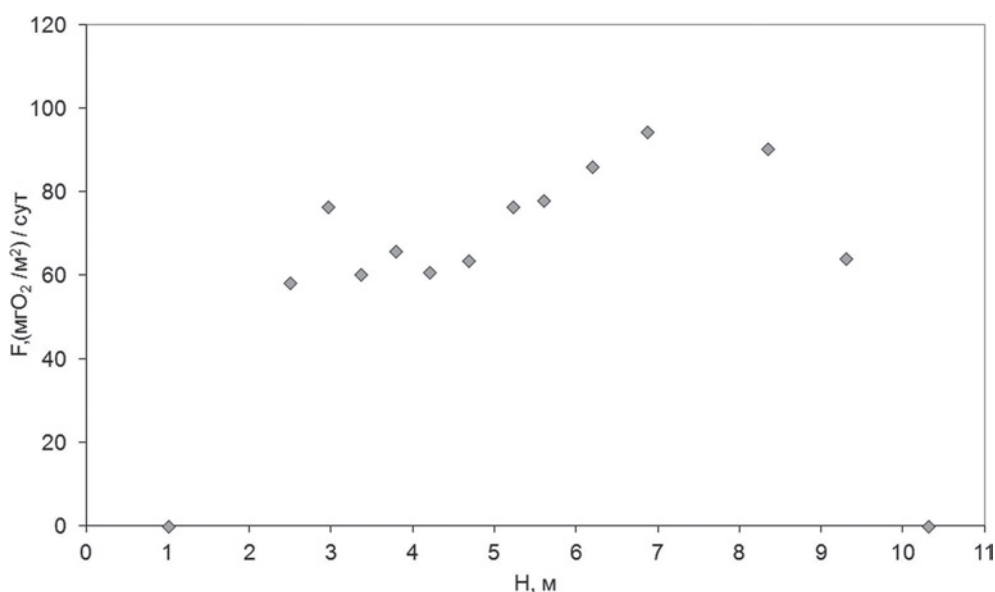


Рис. 4. Скорости потребления РК илами на станциях с разными глубинами в оз. Вендюрском (апрель 2008 г.)

Содержание РК в оз. Вендюрском и скорость его уменьшения ($\Delta PK/\Delta t$) в течение зимы 2007–2008 гг. по данным косы

Период измерений	Δt , сут	РК, т		ΔPK , т	$\Delta PK/\Delta t$, т/сут	C_0 , мг/л	C_1 , мг/л
		начало	конец				
15.11.07–15.12.07	30	570,8	547,8	23,0	0,77	11,4	11,0
15.12.07–14.01.08	30	547,8	525,3	22,5	0,75	11,0	10,5
14.01.07–13.02.08	30	525,3	495,0	30,3	1,01	10,5	9,9
13.02.07–14.03.08	30	495,0	459,1	35,9	1,20	9,9	9,2
14.03.07–13.04.08	30	459,1	430,2	28,9	0,96	9,2	8,6

Примечание. C_0 и C_1 – начальное и конечное значения средневзвешенных по озеру концентраций РК в рассматриваемые периоды Δt .

всей площадью донных отложений, который составил 645 кг O_2 за сутки. Если принять во внимание, что примерно 10 % площади озера покрыто твердыми седиментами (песок, галька, глина), где потребление РК поверхностью донных отложений незначительно, то полученное нами значение должно быть уменьшено также на 10 %, что дает оценку около 590 кг O_2 за сутки.

Содержание РК в объеме всего озера на каждые 30-е сутки зимнего сезона 2007–2008 гг., а также скорость изменения РК, рассчитанная по данным косы, приведены в таблице. Скорость уменьшения содержания РК в озере в течение зимнего сезона изменялась от 0,75 до 1,20 т/сут. Наименьшие значения соответствовали первым двум месяцам ледостава. Это, вероятно, было вызвано тем, что оценки скорости изменения РК были получены по данным косы, расположенной в центральной части озера, а формирование вертикального профиля РК во времени здесь может отличаться от склоновых станций. По данным пространственных съемок ранее была установлена обратная тенденция изменений скорости РК. Во второй половине марта – первой половине апреля скорость уменьшения РК составляла 0,96 т/сут и была близка к средней скорости за весь зимний сезон – 0,94 т/сут. Сопоставление средней величины скорости уменьшения РК в озере со скоростью потребления кислорода донными отложениями (около 600 кг O_2 за сутки) говорит о том, что в оз. Вендюрском им принадлежит основная роль (на 62–67 %) в изменениях содержания РК в конце зимнего сезона. На деградацию лабильного ОВ в водной толще, как остаточный член, приходится меньше 40 %.

Обсуждение результатов

При определении величины потребления РК донными отложениями в соответствии с законом Фика описывается чисто физический процесс переноса вещества. В то же время распределение концентрации РК в седиментах

следует не физической, а биологической закономерности [Пельш, 1939]. В толще ила сверху вниз убывает питательная ценность детрита и одновременно со снижением кислорода уменьшается количество аэробных бактерий. Скорость процесса окисления определяется «вероятностью встречи аэробных бактерий с молекулами растворенного кислорода и пропорциональна произведению концентрации РК в осадке на численность микроорганизмов, отнесенную к единице объема водонасыщенного пористого осадка» [Мизандронцев, 1990]. Наибольшей напряженности микробиологические процессы, определяющие поток РК в ил, достигают у самой его поверхности, где осажены свежие порции детрита. При переходе от поверхности ила в более глубокие его слои развитие аэробных микроорганизмов ослабевает по мере уменьшения концентраций кислорода и количества легкоусвояемых углеводов. Тем самым контролируется толщина слоя окисления и устанавливаются абсолютные значения максимальных градиентов РК вблизи границы вода-дно в соответствии с соотношением скоростей его потребления в результате микробиологической деятельности и физического диффузионного выравнивания концентрации. Скорость химических реакций и активность бактерий зависят от температуры воды. В результате увеличения температуры воды на один градус при низких ее значениях (от 5 до 7 °C) скорость обмена РК в соответствии с температурными поправками возрастает на 15 % [Мизандронцев, 1990]. В качестве важных факторов, определяющих потребление кислорода донными отложениями, также можно назвать типы грунтов и количество макрозообентоса, который не только расходует кислород, но и создает сеть каналов в осадках, изменяя их текстуру [Бреховских и др., 2006].

Поверхностный слой ила с максимальными градиентами РК в оз. Вендюрском имеет толщину около 1–2 см. По измерениям окислительно-восстановительного потенциала в донных отложениях других водоемов [Mortimer, 1971;

Бреховских, 1988] толщина деятельного слоя аэробных микроорганизмов также ограничена очень тонким слоем до нескольких мм. Полученные нами оценки толщины градиентного слоя РК на границе вода-донные отложения для озера Вендюрского превышают результаты, приведенные в работе [Gundersen, Jorgensen, 1991], почти на порядок: измерения *in situ* на границе вода-морские седименты микроэлектродным датчиком позволили установить, что толщина градиентного слоя РК не превышает 1–3 мм. Столь заметное различие связано с тем, что морские донные осадки, вероятно, были в большей степени уплотнены, чем сильно насыщенные водой илы в малом озере, в результате чего в них могла быть выше концентрация ОВ на единицу объема пористого осадка.

Нами была установлена зависимость скорости потребления РК поверхностью донных отложений от глубины. Меньшие скорости потребления РК илами в оз. Вендюрском на глубинах до 5 м (рис. 4), по сравнению с горизонтами 6–8 м, можно объяснить более низкой температурой воды у дна на мелководных станциях и меньшим процентным содержанием лабильного ОВ в донных отложениях, поскольку осевшее на дно свежееобразованное ОВ в осенний период при усилении ветров легко взмучивается и в конечном итоге переносится в глубоководную зону. Уменьшение скорости деструкции ОВ на поверхности илов на глубинах более 8 м обусловлено существенным снижением концентрации РК в придонном пограничном слое в конце зимы. Полученные нами результаты совпадают с выводами о ведущей роли количества ОВ в донных отложениях, как фактора, определяющего интенсивность потребления РК донными отложениями в начале зимы, и содержания РК в придонной воде – в конце периода ледостава [Бреховских и др., 2003].

Кислородный режим оз. Вендюрского по результатам измерений в зимние месяцы 2002–2009 гг. детально рассмотрен в работе [Тержевик и др., 2010]. По данным пространственных съемок в разные периоды зимы были получены средневзвешенные концентрации кислорода в целом для всего озера (с учетом его батиграфической кривой) и оценена скорость изменения содержания РК в течение зимы. Было показано, что изменение содержания РК в озере Вендюрском зимой обусловлено главным образом деструкцией ОВ в водной толще и донных отложениях, при этом максимальная скорость снижения РК была отмечена в придонных слоях центральной котловины и локальных углублениях дна, что косвенно подтверждает полученный нами вывод о преобладании поглощения

РК илами (более 60 %) по сравнению с водной толщей (менее 40 %). Как показано в работе Бреховских с соавторами [2003], вклад донных отложений Можайского водохранилища в потребление РК в придонном слое не превышал 40 % в первую половину зимы и увеличился до 50–75 % во вторую, что также неплохо согласуется с полученными нами оценками для конца периода ледостава.

Заключение

Показана возможность проведения измерений *in situ* растворенного кислорода с высоким разрешением по вертикали вблизи границы вода-донные отложения в мелком озере в период ледостава. Измерения в отобранных стратометром колонках показали, что максимальные градиенты РК на склоновых станциях наблюдаются у самой поверхности донных отложений. Толщина слоя ила, где концентрация кислорода резко снижается до десятых долей мгО₂/л, не превышает 1–2 см. Поэтому для получения корректных оценок скоростей обмена РК на границе с донными отложениями необходимо проводить измерения с разрешением по вертикали через несколько мм.

На примере оз. Вендюрского показана зависимость скорости потребления растворенного кислорода илистыми донными отложениями от глубины места. Наибольшие скорости потребления соответствуют глубинам 6–8 м, где температура воды выше, чем на прибрежных станциях, но еще достаточно высокие концентрации кислорода в надилловой воде. Они в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами. В центральной котловине озера и других локальных углублениях дна обмен между водой и донными отложениями лимитируется низким содержанием растворенного кислорода в придонных слоях.

В период ледостава в мелком мезотрофном озере основную роль в изменениях содержания кислорода играет его потребление донными отложениями на окисление осажденных органических веществ. Вклад поглощения РК поверхностью донных отложений в оз. Вендюрском превышает 60 % от общего объема его уменьшения во всей водной толще.

Литература

- Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
- Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н., Кремневецкая Е. Р., Ломова Д. В. Об оценке потребления

кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 82–91.

Бреховских В. Ф., Гашкина Н. А., Кременецкая Е. Р., Ломова Д. В. Особенности кислородного режима Можайского водохранилища в период ледостава // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 103–109.

Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10(1). С. 414–421.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова 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. doi: 10.3103/S106837391509006X

Кременецкая Е. Р. Оценка скорости потребления кислорода в толще воды Можайского и Иваньковского водохранилищ // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 3. С. 310–317.

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

Лозовик П. А. Химический состав взвеси, твердой и жидкой фракций илов и обменные процессы «вода – дно». Изменение гидрохимического режима оз. Суоярви // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1991. С. 114–118.

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

Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 86 с.

Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Петров М. П., Терзевик А. Ю. Гидрофизические аспекты развития экосистемных процессов замерзающих озер // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: матер. юбил. конф., посвящ. 15-летию ИВПС. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 359–377.

Пельш А. Д. О неоднородности жидкой фазы ила (гидрохимическая роль микроорганизмов) // Ученые записки ЛГУ. 1939. № 30, вып. 8. С. 5–46.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162. doi: 10.1134/S0097807806020035

Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1991. 212 с.

Пуклаков В. В., Эдельштейн К. К., Кременецкая Е. Р., Гашкина Н. А. Самоочищение вод Можайского водохранилища зимой // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 6. С. 711–720.

Романенко В. И. Микрофлора, фитопланктон и высшая водная растительность внутренних водоемов. Л.: Наука, 1967. 61 с.

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Калмыков М. В. Изменение гидрохимического режима озера Крошнозера в результате антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1990. 37 с.

Стравинская Е. А. Особенности гидрохимического режима оз. Красного // Озера Карельского перешейка. Л.: Наука, 1971. С. 129–210.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова 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. doi: 10.1134/S0097807810050064

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. No. 151. P. 331–340.

Gundersen J. K., Jergensen B. B. Fine-scale in situ measurements of oxygen distribution in marine sediments // Kieler Meeresforsch. Sonderh. 1991. 8. P. 376–380.

Lerman A. Geochemical Processes: Water and Sediment Environments. N. Y.: Wiley-Interscience. 1979. 481 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure // Nordic Hydrol. 1997a. Vol. 28, no. 2. P. 99–128.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes // Nordic Hydrology. 1997b. Vol. 28, no. 2. P. 129–152.

Mortimer C. H. Chemical exchange between sediment and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms // Limnol. Oceanogr. 1971. Vol. 16, no. 2. P. 387–404.

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovennov R., Zdorovennova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Поступила в редакцию 21.07.2016

References

Brekhovskikh V. F. Gidrofizicheskie factory formirovaniya kislorodnogo rezhima vodoemov [Hydrophysical

factors of formation of oxygen regime of water bodies]. Moscow: Nauka, 1988. 168 p.

Brekhovskikh V. F., Vishnevskaya G. N., Kremetskaya E. R., Lomova D. V. Ob otsenke potrebleniya kisloroda raznymi tipami gruntov dolinnykh vodokhranilishch v letnii period [On the oxygen demand estimation of different types of bottoms in valley reservoirs during summer]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2006. No. 10. P. 82–91.

Brekhovskikh V. F., Gashkina N. A., Kremetskaya E. R., Lomova D. V. Osobennosti kislorodnogo rezhima Mozhaiskogo vodokhranilishcha v period ledostava [Oxygen regime peculiarities of the Mozhaisk reservoir during freeze-up]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2003. No. 1. P. 103–109.

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Terzhevik A. Yu. Vliyanie ekstremal'no zharkogo leta 2010 g. na temperaturu vody i raspredelenie kisloroda v ozerakh Karelii [Effects of the extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution in the Karelian lakes]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2015. No. 9. P. 67–76. doi: 10.3103/S106837391509006X

Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Termicheskie i kislorodnye rezhimy melkovodnogo ozera na etape letnego nagrevaniya [Thermal and oxygen regimes of a shallow lake during summer heating]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]. 2014. No. 10(1). P. 414–421.

Kremetskaya E. R. Otsenka skorosti potrebleniya kisloroda v tolshche vody Mozhaiskogo i Ivan'kovskogo vodokhranilishch [Assessment of the oxygen consumption rate in the water column for the Mozhaisk and Ivankovo reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 3. P. 310–317.

Litinskaya K. D., Polyakov Yu. K. Ozera Vendyurskoi gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of Vendyury 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.

Lozovik P. A. Khimicheskii sostav vzvesi, tverdoi i zhidkoi fraktsii ilov i obmennye protsessy “voda – dno”. Izmenenie gidrokhimicheskogo rezhima oz. Suoyarvi [Chemical composition of dredge, solid and liquid fractions of silt and “water-bottom” exchange processes]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Surface Waters of the Lake-River System of Shuya under Human Impact]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1991. P. 114–118.

Mizandrntsev I. B. Khimicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov [Chemical processes in bottom sediments of water reservoirs]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p.

Pal'shin N. I. Termicheskie i gidrodinamicheskie protsessy v ozerakh v period ledostava [Thermal and hydrodynamic processes in lakes during freeze-up]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. 86 p.

Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Petrov M. P., Terzhevik A. Yu. Gidrofizicheskie aspekty razvitiya ekosistemnykh protsessov zamerzayushchikh ozer [Hydrophysical aspects of ecosystem processes development of freezing

lakes]. *Vodnye resursy Evropeiskogo Severa Rossii: itogi i perspektivy issledovaniy: mater. yubil. konf., posvyasch. 15-letiyu IVPS* [Water Res. of the European North of Russia. Research Results and Prospects: Materials of the Anniv. Conf. Dedicated to the 15th Anniv. of the NWPI]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 359–377.

Pel'sh A. D. O neodnorodnosti zhidkoi fazy ila (gidrokhimicheskaya rol' mikroorganizmov) [On the heterogeneity of a liquid phase of silt (hydrochemical role of microorganisms)]. *Uchenye zapiski LGU* [Proceed. of LSU]. 1939. No. 30, iss. 8. P. 5–46.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Osobennosti termicheskoi struktury melkovodnogo ozera v nachale zimy [Thermal structure peculiarities of a shallow lake in early winter]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 154–162. doi: 10.1134/S0097807806020035

Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya [Surface waters of the lake-river system of Shuya under human impact]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1991. 212 p.

Romanenko V. I. Mikroflora, fitoplankton i vysshaya vodnaya rastitel'nost' vnutrennykh vodoemov [Microflora, phytoplankton and higher aquatic plants of inland water reservoirs]. Leningrad: Nauka, 1967. 61 p.

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Kalmykov M. V. Izmenenie gidrokhimicheskogo rezhima ozera Kroshnozera v rezul'tate antropogennogo vozdeistviya [Change of the hydrochemical regime of Kroshnozera lake as a result of human impact]. Petrozavodsk: Kareliya, 1990. 37 p.

Stravinskaya E. A. Osobennosti gidrokhimicheskogo rezhima oz. Krasnogo [Hydrochemical regime peculiarities of Krasnoe lake]. *Ozera Karelskogo peresheika* [Lakes of the Karelian Isthmus]. Leningrad: Nauka, 1971. P. 129–210.

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova 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. C. 568–579. doi: 10.1134/S0097807810050064

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007. No. 151. P. 331–340.

Gundersen J. K., Jergensen B. B. Fine-scale in situ measurements of oxygen distribution in marine sediments. *Kieler Meeresforsch. Sonderh.* 1991. 8. P. 376–380.

Lerman A. *Geochemical Processes: Water and Sediment Environments*. N. Y.: Wiley-Interscience. 1979. 481 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure. *Nordic Hydrol.* 1997a. Vol. 28, no. 2. P. 99–128.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes. *Nordic Hydrology*. 1997b. Vol. 28, no. 2. P. 129–152.

Mortimer C. H. Chemical exchange between sediment and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms. *Limnol. Oceanogr.* 1971. Vol. 16, no. 2. P. 387–404.

Puklakov V. V., Edelshtein K. K., Kremenetskaya E. R., Gashkina N. A. Water self-purification in Mozhaisk reservoir in winter. *Water Resources.* 2002. Vol. 29, no. 6. P. 655–664.

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenнова G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecology.* 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Received July 21, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник лаб. 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

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.: 89116660369

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

Здоровеннов Роман Эдуардович

ведущий 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.: 89212209438

Гавриленко Галина Геннадиевна

аспирант, 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
тел.: 89602115561

Богданов Сергей Рэмович

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

CONTRIBUTORS:

Palshin, Nikolai

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

Zdorovenнова, Galina

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

Efremova, Tatyana

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

Zdorovenнов, Roman

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

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com
tel.: +79602115561

Bogdanov, Sergey

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

Волков Сергей Юрьевич

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

Тержевик 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

Volkov, Sergey

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

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru
tel.: +79217267356

УДК 54.062

ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БАРНАУЛА В ПРИРОДНЫЕ ВОДОТОКИ

О. М. Лабузова^{1,2}, Т. В. Носкова¹, М. С. Лысенко^{1,2},
Е. Г. Ильина², Т. С. Папина¹

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

² Алтайский государственный университет, Барнаул

Исследование снежного покрова в черте г. Барнаула показало превышение в нем среднего содержания нефтепродуктов по сравнению с фоновыми значениями до пяти раз. Наиболее высокие концентрации наблюдались в точках, расположенных вблизи частного сектора с печным отоплением и крупных автомагистралей с интенсивным транспортным движением. Рассчитано, что ежегодное поступление нефтепродуктов с территории г. Барнаула в природные водоемы с талыми водами составляет более шести тонн.

К л ю ч е в ы е с л о в а: снежный покров; городские снегоотвалы; загрязнение; нефтепродукты; автотранспорт.

**O. M. Labuzova, T. V. Noskova, M. S. Lysenko, E. G. Ilyina, T. S. Papina.
ESTIMATION OF INFLOW OF PETROLEUM HYDROCARBONS FROM THE
CITY OF BARNaul TO NATURAL WATERCOURSES**

Fluorimetric study of the snow cover within the city of Barnaul showed the average content of oil products therein exceeded background values up to five-fold. The highest concentrations were registered in sites located near single-family stove-heated homes neighborhoods and near highways with heavy traffic. Annual flow of oil products with melt water from Barnaul city territory to natural waterbodies was estimated to be more than 6 tons.

Key words: snow cover; municipal snow disposal sites; pollution; oil products; motor transport.

Введение

Нефтяные углеводороды являются наиболее распространенными поллютантами антропогенного происхождения, присутствующими в окружающей среде [Василенко, 2010]. Они представляют собой сложную смесь множества разных соединений, не имеющую постоянного состава, и этим они существенно отличаются

от многих других органических загрязняющих веществ [Бродский, 2002; Noyo Edema, 2012]. К тому же большинство нефтяных углеводородов являются канцерогенами и обладают способностью к бионакоплению [Смольникова и др., 2009]. Поэтому даже небольшие концентрации нефтепродуктов (НП) при длительном воздействии на живые организмы представляют экологическую опасность. Основными

источниками их антропогенной эмиссии в окружающую среду являются выбросы промышленных предприятий и выхлопы автотранспорта [Носкова и др., 2014]. Поскольку атмосферные осадки играют очень важную роль в формировании химического стока природных вод, их исследование представляет интерес как для оценки качества природных вод, так и для определения степени антропогенной нагрузки. При этом снежный покров можно использовать в качестве объекта мониторинга, как интегральный показатель загрязненности воздушной среды в холодный период года [Шумилова и др., 2012].

Цель нашей работы – количественная оценка поступления нефтепродуктов с территории г. Барнаула вместе с талыми и ливневыми водами в природные водотоки.

Материалы и методы

В период максимального снегонакопления в марте 2015 и 2016 гг. были отобраны пробы снежного покрова в разных районах г. Барнаула, а также в фоновой точке в с. Гоньба, расположенной в стороне от преимущественного направления ветров (рис. 1). Снег отбирали методом конверта, на всю глубину залегания, в чистые полиэтиленовые пакеты и доставляли в лабораторию, где он таял в стеклянной посуде при комнатной температуре. Пробы воды из ливневых коллекторов, имеющих выпуск в р. Барнаулка, отбирали в бутылки из темного стекла после прохождения обильных дождевых осадков в июле и октябре 2015 г. (рис. 2).

Дождевые пробы отбирали в центре г. Барнаула на открытой площадке здания



Рис. 1. Карта-схема отбора проб:

1–6 – точки отбора снежного покрова; Ф – фоновая точка отбора снежного покрова; Л – точки отбора ливневых вод (рис. 2)

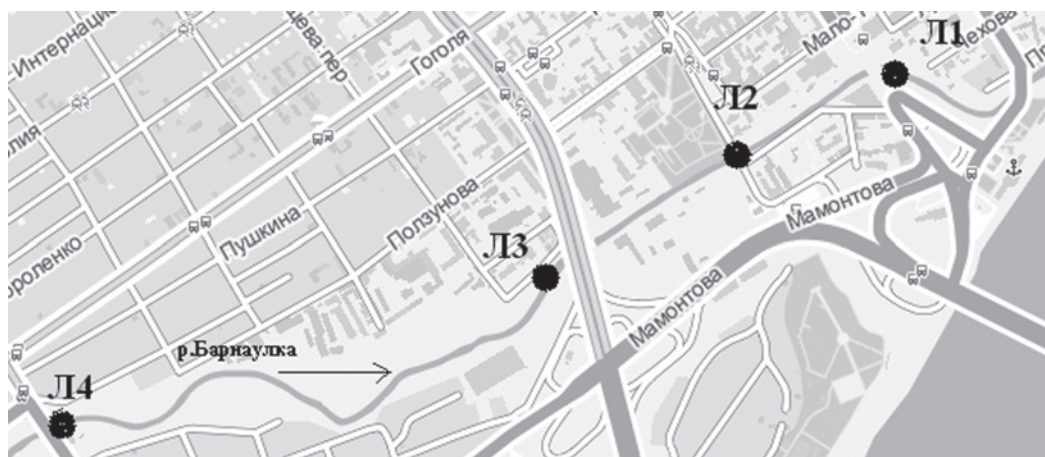


Рис. 2. Карта-схема расположения точек отбора проб ливневых вод

Таблица 1. Содержание нефтепродуктов в ливневой воде г. Барнаула в сравнении с нормативными значениями

Показатель, мг/дм ³	Дата отбора	Ливневые воды				ПДК _{р.х.}	ДК
		Л1	Л2	Л3	Л4		
Нефтепродукты	13.06.15	0,42	н. о.	н. о.	0,08	0,05	0,15
	13.10.15	н. о.	0,10	0,20	0,17		

Примечание. ПДК_{р.х.} – предельно допустимая концентрация для природных вод рыбохозяйственного назначения; ДК – допустимая концентрация загрязняющих веществ при их приеме в систему городской канализации г. Барнаула; н. о. – нет отбора.

ИВЭП СО РАН с марта по октябрь 2015 г. Определение нефтепродуктов в пробах талой воды снежного покрова, ливневых вод и атмосферных осадков после экстракции гексаном проводили на анализаторе жидкости «Флюорат-02-3М». Достоверность и правильность результатов анализа подтверждена методом добавок, использованием государственных стандартных образцов и поверенного измерительного оборудования.

Результаты и обсуждение

Содержание нефтепродуктов в дождевых осадках г. Барнаула за исследуемый период изменяется от 0,02 до 0,10 мг/дм³ со средним значением $0,040 \pm 0,0052$ мг/дм³ (рис. 3). Наиболее высокие концентрации наблюдались в осенние месяцы и связаны как с уменьшением объема осадков, так и с началом отопительного сезона и вследствие этого увеличением нефтепродуктов в окружающей среде. В холодный период года содержание нефтепродуктов в атмосферных осадках значительно выше в сравнении с теплым периодом [Лысенко, Лазузова, 2016].

В таблице 1 приведены данные содержания нефтепродуктов в пробах ливневой воды, из

которых следует, что концентрация нефтепродуктов широко варьирует и превышает ПДК_{р.х.} в 1,6–8,4 раза. Ранее проведенный анализ качества поверхностного стока в Центральном районе г. Барнаула показал превышение значения рыбохозяйственного норматива в 9–26 раз по содержанию нефтепродуктов [Полетаева и др., 2011]. Содержание нефтепродуктов в пробах ливневых вод в точках отбора (Л1 и Л3), сток на которые приходится с транспортных магистралей с интенсивной автомобильной загрузкой, превышает значения допустимой концентрации для сточных вод, регламентируемой постановлением администрации г. Барнаула.

На рисунке 4 представлена гистограмма содержания нефтепродуктов в талой воде снежного покрова г. Барнаула в разные годы. Концентрация НП в городских точках превышает фоновые значения, что свидетельствует о существующем загрязнении городской атмосферы. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в точке 5, находящейся с подветренной стороны от частного сектора с печным отоплением. А также в точках 1 и 4, расположенных вблизи городских магистралей с очень интенсивным движением транспорта.

Так как во время снеготаяния талые воды напрямую попадают в водные объекты, то для

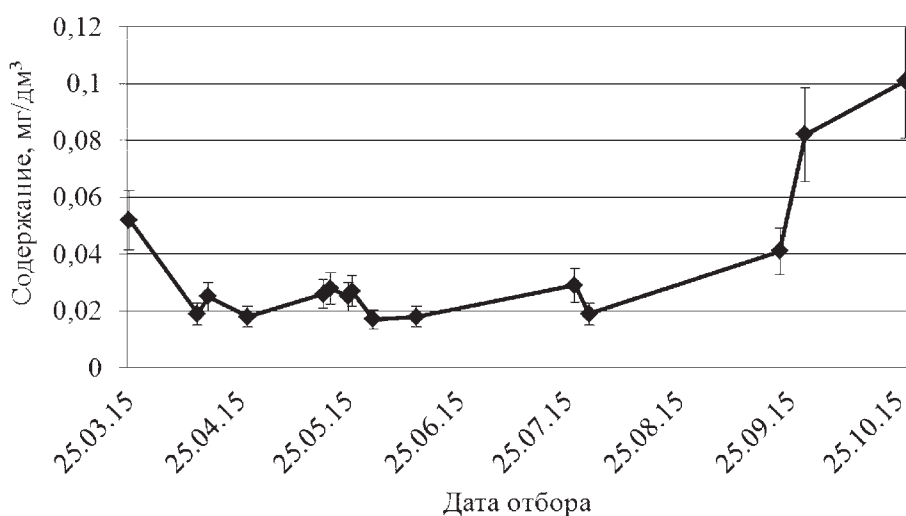


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов в атмосферных дождевых осадках

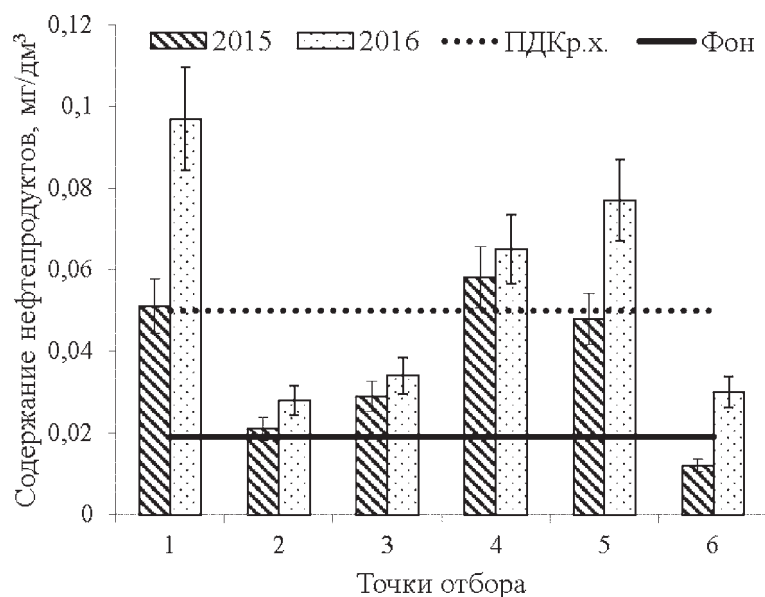


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов в талой воде снежного покрова в различных районах г. Барнаула в 2015 и 2016 гг.

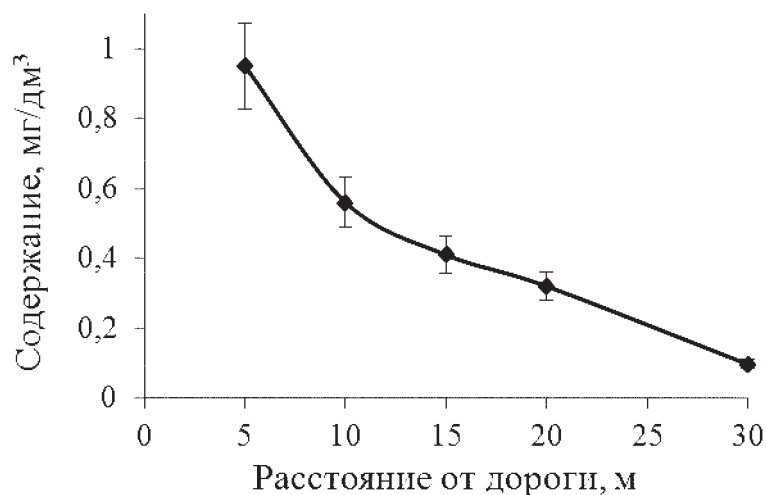


Рис. 5. Зависимость содержания нефтепродуктов от расстояния от дороги

оценки их качества нами были использованы нормативы рыбохозяйственного назначения ($ПДК_{р.х.}$), установленные для природных вод. В 2015 г. в талой воде снежного покрова г. Барнаула превышение $ПДК_{р.х.}$ по НП было в пределах погрешности инструментального определения, однако в 2016 г. отмечено существенное увеличение концентрации в точках 1, 4 и 5. Как известно из литературных источников, снежный покров особенно загрязнен вблизи автомобильных дорог [Рапута и др., 2010; Шумилова, Жиделева, 2010; Киоррамаки et al., 2014], что также подтверждают данные нашего исследования (рис. 5). Содержание нефтепродуктов в снежном покрове значительно уменьшается по мере удаления от дорожного полотна. Вблизи автодороги концентрация НП в 10

раз выше, чем в городском снежном покрове, отобранном вне зоны загрязняющего влияния автотранспорта. Поскольку снег на дороге особенно загрязнен нефтепродуктами, его вывоз и утилизацию необходимо проводить с соблюдением мер, предотвращающих загрязнение окружающей среды, в первую очередь малых городских водотоков и их водосборных бассейнов. Однако в большинстве случаев снеговые свалки расположены в водоохраных зонах рек. Так, концентрация нефтепродуктов в снегоотвале, куда в течение зимнего периода свозился загрязненный снег с городских дорог и улиц, в 2013 г. достигала 4–7 мг/дм³, что составляет 80–140 $ПДК_{р.х.}$ [Носкова и др., 2015].

Содержание НП в исследуемом снегоотвале в марте 2016 г. составило 4 мг/дм³, что

Таблица 2. Расчет количества нефтепродуктов, поступающих с поверхностным стоком в речные воды

Расчетные показатели	Талые воды		Дождевые воды
	Год		
	2015	2016	2015
Средняя концентрация НП в городском снежном покрове, мг/дм ³	0,04	0,06	–
Средняя концентрация НП в дождевых осадках, мг/дм ³	–	–	0,04
Средняя концентрация НП в снегоотвалах, мг/дм ³	4,0	4,0	–
Средняя концентрация НП в ливневых водах, мг/дм ³	–	–	0,2
Количество выпавших осадков, мм	120	104	275
Площадь дорожного покрытия, га	2000		
Площадь города Барнаула, га	32 200		
Среднегодовой объем вод с городской территории, м ³	21 744 000	18 844 800	4 4275 000
Среднегодовой объем вод с дорожного покрытия, м ³	1 440 000	1 248 000	2750 000
Количество НП с городской территории, т	0,9	1,1	1,8
Количество НП с территории дорожного полотна, т	5,8	5,0	0,6
Общее количество нефтепродуктов, т	6,7	6,1	2,4

в 67–100 раз выше средней концентрации нефтепродуктов в талой воде всего городского снежного покрова.

Поэтому при расчете количества НП, попадающего в водоемы с поверхностным стоком с территории города, мы учитывали площадь дорожного полотна со средним содержанием нефтепродуктов 4 мг/дм³ и площадь всей оставшейся городской территории со средним содержанием НП в снежном покрове в разные годы отбора. Данные представлены в таблице 2. Определение среднегодового объема талых и дождевых вод проводили, используя формулы 1 и 2, приведенные в [Рекомендации..., 2014].

$$W_T = 10 \times h_c \times \Psi_T \times F, \quad (1)$$

где F – площадь стока, га; h_c – слой снеговых осадков, мм; Ψ_T – коэффициент талого стока;

$$W_D = 10 \times h_d \times \Psi_D \times F, \quad (2)$$

где F – площадь стока, га; h_d – слой дождевых осадков, мм; Ψ_D – коэффициент дождевого стока.

Количество нефтепродуктов, поступающих с поверхностным стоком в водные объекты, рассчитывали по формуле (3):

$$M = (C \times W) / 1\,000\,000, \quad (3)$$

где W – среднегодовой объем талых или дождевых вод, м³; C – концентрация нефтепродуктов, мг/дм³; M – количество нефтепродуктов, т.

Выводы

За период исследований с территории г. Барнаула с талыми и ливневыми стоками

в речные воды попадает около 8 тонн нефтепродуктов, что может негативно сказываться на экологическом состоянии водоемов. Наибольшее количество нефтяных углеводородов поступает в период снеготаяния.

Литература

- Бродский Е. С.* Идентификация нефтепродуктов в объектах окружающей среды с помощью газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии // Журнал аналитической химии. 2002. Т. 57, № 6. С. 592–596.
- Василенко Ю. Г., Корилов А. М., Орнацкая Г. Н.* Экологический контроль органических загрязнителей (нефтепродуктов, жиров и НПВ) в водных объектах // Экологические системы и приборы. 2010. № 9. С. 3–5.
- Лысенко М. С., Лабузова О. М.* Нефтепродукты в атмосферных осадках города Барнаула // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых им. проф. Л. П. Кулева, посвященной 120-летию Томского политехнического университета (г. Томск, 17–20 мая 2016 г.). Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2016. С. 475–476.
- Носкова Т. В., Эйрих А. Н., Дрюпина Е. Ю., Серых Т. Г., Овчаренко Е. А., Папина Т. С.* Исследование качества снежного покрова г. Барнаула // Ползуновский вестник. 2014. № 3. С. 208–212.
- Носкова Т. В., Эйрих С. С., Овчаренко Е. А., Усков Т. Н., Папина Т. С.* Оценка влияния городских снегоотвалов на загрязнение малых рек и прилегающих территорий // Известия АО РГО. 2015. № 2. С. 10–15.
- Полетаева М. А., Сомин В. А., Комарова Л. Ф.* Очистка поверхностного стока центрального района г. Барнаула // Ползуновский вестник. 2011. № 4–2. С. 146–150.
- Рапута В. Ф., Коковкин В. В., Морозов С. В.* Экспериментальное исследование и численный анализ

процессов распространения загрязнения снегового покрова в окрестностях крупной магистрали // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. № 18. С. 63–70.

Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: НИИ ВОДГЕО, 2014. 88 с.

Смоляникова В. В., Емельянов С. А., Дементьев М. С. Воздействие углеводородов нефти на окружающую среду и способы очистки нефтезагрязненных субстратов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 1(6). С. 1378–1380.

Шумилова М. А., Жиделева Т. Г. Особенности загрязнения снежного покрова вблизи крупных автомагистралей Ижевска // Вестник Удмуртского

университета. Серия: Физика и химия. 2010. № 4–2. С. 90–97.

Шумилова М. А., Садиуллина О. В., Петров В. Г. Исследование процесса накопления загрязняющих веществ городской атмосферы в снежном покрове на примере г. Ижевска // Вестник Удмуртского университета. 2012. № 4–3. С. 87–93.

Kuoppamaki K., Setala H., Rantalainen A.-L., Kotze D. J. Urban snow indicates pollution originating from road traffic // Environmental Pollution. 2014. Vol. 195. P. 56–63.

Noyo Edema. Effects of Crude Oil Contaminated Water on the Environment // Crude Oil Emulsions – Composition Stability and Characterization. 2012. P. 169–180.

Поступила в редакцию 30.09.2016

References

Brodskij E. S. Identifikatsija nefteproduktov v ob'ekтах okruzhajushhej sredy s pomoshh'ju gazovoj hromatografii i hromato-mass-spektrometrii [Oil products identification in environmental objects using gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry]. *Zhurnal analiticheskoj himii [Journal of Analytical Chemistry]*. 2002. Vol. 57, no. 6. P. 592–596.

Lysenko M. S., Labuzova O. M. Nefteprodukty v atmosferyh osadkah goroda Barnaula [Oil products in atmospheric precipitation in Barnaul]. *Himija i himicheskaja tehnologija v XXI veke: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov i molodyh uchenyh imeni professora L. P. Kuljova, posvjashhennoj 120-letiju Tomsk. politehn. un-ta (g. Tomsk, 17–20 maja 2016 g.) [Chemistry and Chemical Technologies in the XXI Cent.: Mat. of XVII Int. Res. and Practical Conf. of Students and Young Scientists named after Professor L. P. Kulev Dedicated to the 120th Anniv. of the Tomsk Polytechnic Univ. (Tomsk, May 17–20, 2016)]* Tomsk: Tomsk. politehn. un-t, 2016. P. 475–476.

Noskova T. V., Jejrjeh A. N., Drjupina E. Ju., Seryh T. G., Ovcharenko E. A., Papina T. S. Issledovanie kachestva snezhnogo pokrova g. Barnaula [Snow cover quality assessment in Barnaul]. *Polzunovskij vestnik [Polzunovsky Vestnik]*. 2014. No. 3. P. 208–212.

Noskova T. V., Jejrjeh S. S., Ovcharenko E. A., Uskov T. N., Papina T. S. Otsenka vlijanija gorodskih snegotvalov na zagrjaznenie malyh rek i prilegajushshih territorij [Assessment of urban snow disposal sites impact on contamination of small rivers and adjacent territories]. *Izvestija AO RGO [Bulletin AB RGS]*. 2015. No. 2. P. 10–15.

Poletaeva M. A., Somin V. A., Komarova L. F. Ochistka poverhnostnogo stoka central'nogo rajona g. Barnaula [Surface run-off cleaning in the central district of Barnaul]. *Polzunovskij vestnik [Polzunovsky Vestnik]*. 2011. No. 4–2. P. 146–150.

Raputa V. F., Kokovkin V. V., Morozov S. V. Jeksperimental'noe issledovanie i chislennyj analiz protsessov rasprostraneniya zagrjaznenija snegovogo pokrova v okrestnostjah krupnoj magistrali [Experimental research and numerical analysis of snow cover pollution

processes in the environs of a large highway]. *Himija v interesah ustojchivogo razvitija [Chemistry for Sustainable Development]*. 2010. No. 18. P. 63–70.

Rekomendacii po raschjotu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverhnostnogo stoka s selitebnyh territorij, ploshhadok predpriyatij i opredeleniju uslovij vypuska ego v vodnye ob'ekty [Recommendations for calculating systems of surface run-off collecting, disposal and cleaning from residential areas and industrial sites, and for specifying conditions of its release into water bodies]. Moscow: NII VODGEO, 2014. 88 p.

Smol'nikova V. V., Emel'janov S. A., Dement'ev M. S. Vozdejstvie uglevodorodov nefiti na okruzhajushhuyu sredyu i sposoby ochistki neftezagrjaznennyh substratov [Influence of oil hydrocarbons on environment and ways of oil-contaminated substrates cleaning]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk [Proceed. of the Samara Scientific Center of the RAS]*. 2009. Vol. 11, no. 1(6). P. 1378–1380.

Shumilova M. A., Zhideleva T. G. Osobennosti zagrjaznenija snezhnogo pokrova vblizi krupnyh avtomagistralей Izhevsk [Peculiarities of snow cover pollution near large highways of Izhevsk]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Serija: Fizika i himija [Bulletin of Udmurt University. Physics and Chemistry]*. 2010. no. 4–2. P. 90–97.

Shumilova M. A., Sadiullina O. V., Petrov V. G. Issledovanie protsessa nakoplenija zagrjaznjajushshih veshchestv gorodskoj atmosfery v snezhnom pokrove na primere g. Izhevsk [Study of urban atmospheric pollutants accumulation in snow cover by the example of Izhevsk]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta [Bulletin of Udmurt University]*. 2012. No. 4–2. P. 87–93.

Vasilenko Ju. G., Korikov A. M., Ornackaja G. N. Jekologicheskij kontrol' organicheskijh zagrjaznitelej (nefteproduktov, zhиров i NPAV) v vodnyh ob'ektah [Environmental monitoring of organic pollutants (oil products, fats and inorganic substances surfactants) in water bodies]. *Jekologicheskie sistemy i pribory [Ecological Systems and Devices]*. 2010. No. 9. P. 3–5.

Kuoppamaki K., Setala H., Rantalainen A.-L., Kotze D. J. Urban snow indicates pollution originating from

road traffic. *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 195. P. 56–63.

Noyo Edema. Effects of Crude Oil Contaminated Water on the Environment. *Crude Oil Emulsions* –

Composition Stability and Characterization. 2012. P. 169–180.

Received September 30, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лабузова Ольга Михайловна

аспирант
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: mom9292@mail.ru
тел.: 89039912661

Носкова Татьяна Витальевна

инженер химико-аналитического центра
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: ntv.lady@yandex.ru
тел.: 89236456179

Лысенко Мария Сергеевна

инженер химико-аналитического центра
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: m_l_s_55@mail.ru
тел.: 89612336610

Ильина Елена Георгиевна

доцент кафедры физической и неорганической
химии, к. х. н.
Алтайский государственный университет
пр. Ленина, 61, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656049
эл. почта: elena_iljina@yahoo.com
тел.: 89130988610

Папина Татьяна Савельевна

начальник химико-аналитического центра, д. х. н.
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: papina@iwep.ru
тел.: 89039578544

CONTRIBUTORS:

Labuzova, Olga

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: mom9292@mail.ru
tel.: +79039912661

Noskova, Tatiana

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: ntv.lady@yandex.ru
tel.: +79236456179

Lysenko, Maria

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: m_l_s_55@mail.ru
tel.: +79612336610

Ilyina, Elena

Altai State University
61 Lenin St., 656049 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: elena_iljina@yahoo.com
tel.: +79130988610

Papina, Tatiana

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: tanya.papina@mail.ru
tel.: +79039578544

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 550.47

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАКРОФИТАМИ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Е. С. Гришанцева¹, А. Ю. Бычков¹, С. А. Шурупова¹, Л. П. Федорова²

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

² Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ), Верхне-Волжское отделение, Конаково Тверской обл.

Впервые определено содержание редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в макрофитах и воде Иваньковского водохранилища с применением современного аналитического метода – масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Приведена сравнительная характеристика составов РЗЭ в макрофитах разных экологических групп – гелофитов (водно-болотных растений) и гидрофитов (погруженных растений), произрастающих в заливах с различной антропогенной нагрузкой. В качестве объекта биогеохимического исследования выбраны два вида макрофитов – манник водяной (*Glyceria aquatica* (L.) Wahlb.) и рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.). Максимальные значения содержания РЗЭ получены для рдеста пронзеннолистного из группы погруженных растений. Рассчитаны коэффициенты биологического поглощения РЗЭ (K_b) в макрофитах относительно воды. Выявлено, что в местах контролируемого сброса сточных вод в водохранилище (Мошковический залив и створ Безбородово) макрофиты накапливают большое количество РЗЭ. Факторный и корреляционный анализ полученных данных позволил установить ассоциацию большинства РЗЭ с Fe и Al, для которых высокие положительные коэффициенты корреляции получены для *Potamogeton perfoliatus*, а для *Glyceria aquatica* – только для легких РЗЭ. С Mn были рассчитаны отрицательные коэффициенты корреляции для обоих видов. Таким образом, процессы сорбции и соосаждения РЗЭ на оксигидроксидах железа, а также образование ассоциированных с Fe и Al органоминеральных коллоидов и соединений играют важную роль в миграции РЗЭ в водных экосистемах. Высокие значения коэффициентов биологического поглощения РЗЭ указывают на их активное участие в биохимических процессах у высших водных растений.

Ключевые слова: экосистема Иваньковского водохранилища; редкоземельные элементы; поверхностные воды; макрофиты; *Glyceria aquatica* (L.) Wahlb.; *Potamogeton perfoliatus* L.; коэффициент биологического накопления.

**E. S. Grishantseva, A. Yu. Bychkov, S. A. Shurupova, L. P. Fedorova.
BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF RARE EARTH ELEMENTS
ACCUMULATION BY MACROPHYTES OF THE IVAN'KOVSKOYE
RESERVOIR**

The content of rare earth elements (REE: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) in macrophytes and water of the Ivankovskoye reservoir was determined for the first time using a modern analytical method of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). REE compositions were comparatively characterized in macrophytes belonging to different ecological groups – helophytes (wetland plants) and hydrophytes (submerged plants) growing in bays with different anthropogenic load. Two macrophyte species, *Glyceria aquatica* (L.) Wahlb. and *Potamogeton perfoliatus* L., were chosen as objects for biogeochemical studies. The highest REE content was found in *Potamogeton perfoliatus* L. from the group of submerged plants (hydrophytes). The coefficients of biological absorption of rare earth elements (K_b) were calculated in macrophytes relative to water. It was established that in areas with high anthropogenic load, macrophytes accumulated large quantities of REE. Factor and correlation analysis of the data showed that most of the REE were associated with Fe and Al, with high positive correlation coefficients obtained in the group of submerged plants. In the group of wetland plants high positive coefficients of correlation with Fe and Al were obtained only for light REE. Coefficients of correlation with Mn were negative for both ecological groups. Thus, the processes of sorption and co-precipitation of REE on iron oxyhydroxides, as well as the formation of colloids and organic compounds associated with Fe and Al play an important role in REE migration in aquatic ecosystems. High values of coefficients of biological absorption of rare earth elements indicate their active participation in the biochemical processes in higher aquatic vegetation.

Key words: Ivan'kovskoye reservoir ecosystem; rare earth elements; surface water; aquatic vegetation; macrophytes; *Glyceria aquatica* (L.) Wahlb.; *Potamogeton perfoliatus* L.; coefficient of bioaccumulation.

Введение

В последние десятилетия в связи с развитием современной промышленности и нанотехнологий постоянно растет объем производства и потребления редкоземельных элементов (РЗЭ) [Баренбойм, 2014]. В связи с этим увеличивается поступление РЗЭ в окружающую среду и водные экосистемы. Редкоземельные элементы считаются слабо и средне распространенными в гидросфере и традиционно не рассматриваются в качестве загрязнителей водных экосистем [Балашов, 1976; Дубинин, 2006]. Роль РЗЭ в процессах жизнедеятельности живых многоклеточных организмов не установлена [Баренбойм, 2014]. Редкоземельные элементы и их соединения в большинстве своем токсичны в природных водах [Иванов, 1997]. Однако распространенность в водных экосистемах, миграционные свойства, токсикологические и биогеохимические особенности редкоземельных элементов изучены недостаточно.

Целью данного исследования является определение содержания редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в тканях высших водных растений (ВВР) Иваньковского водохранилища

р. Волги, а также изучение биогеохимических особенностей накопления РЗЭ высшими водными растениями при различной антропогенной нагрузке.

Иваньковское водохранилище расположено в Тверской области между городами Тверь и Дубна. Актуальность данных биогеохимических исследований обусловлена уникальностью экосистемы Иваньковского водохранилища и его большой практической значимостью. Водохранилище используется в рекреационных и рыбохозяйственных целях и является важнейшим источником питьевого водоснабжения г. Москвы. Оно находится в районе интенсивного хозяйственного освоения и испытывает антропогенное воздействие, которое проявляется как в непосредственном сбросе в речную сеть сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий, коммунальных и ливневых стоков городов, так и в поступлении загрязняющих веществ с поверхностным стоком. Распределение микроэлементов в донных осадках, воде и высшей водной растительности Иваньковского водохранилища изучено довольно хорошо [Абакумова и др., 2000; Гришанцева и др., 2010, 2012], однако данных о распространенности редкоземельных элементов

в экосистеме Иваньковского водохранилища, полученных современными аналитическими методами, в литературе нет.

Поэтому была поставлена задача – охарактеризовать состав редкоземельных элементов в высшей водной растительности, а также выявить общие закономерности распределения РЗЭ в макрофитах различных экологических групп. Высшая водная растительность (ВВР) играет большую роль в продукционных процессах в водоеме, принимает активное участие в процессах миграции и связывания металлов и других загрязняющих веществ, поступающих в водную экосистему. Поскольку миграционные свойства РЗЭ в природных водах тесно связаны с процессами сорбции и соосаждения РЗЭ на оксигидроксидах железа и марганца, с образованием ассоциированных с Fe и Al органоминеральных коллоидов, а также участием этих элементов в процессах фотосинтеза, одновременно с определением РЗЭ проводилось определение Fe, Mn, Al и Ti в водной растительности.

Полученные данные могут использоваться для установления регионального геохимического фона РЗЭ в компонентах аквальной экосистемы типового водохранилища средней полосы бореальной климатической зоны, а также для мониторинговых исследований изменения химического состава природных вод в связи с увеличением антропогенной нагрузки на район Иваньковского водохранилища.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования было выбрано два вида ВВР из разных экологических групп: манник водяной (*Glyceria aquatica* (L.) Wahlb.) из группы прибрежно-водных укореняющихся гелофитов и рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.) из группы погруженных укореняющихся гидрофитов. Манник водяной в своей экологической группе проявляет себя как вид, устойчивый к высокому содержанию загрязнителей в окружающей среде, произрастает повсеместно, в том числе в местах сброса сточных вод, является доминирующим видом среди гелофитов, имеет одну из наибольших биомасс в макрофитном сообществе Иваньковского водохранилища. Рдест пронзеннолистный имеет самые высокие показатели накопления тяжелых металлов в группе погруженных видов, большую распространенность и численность в пределах данного водного объекта. Исследования, проведенные ранее [Гришанцева и др., 2010], показали, что эти виды макрофитов являются специфическими групповыми концентраторами микроэлементов и были рекомендованы в качестве основных объектов при проведении мониторинга экологического состояния Иваньковского водохранилища.

Отбор образцов высшей водной растительности и сопряженных проб воды проводился в июле 2012 года в створах и заливах

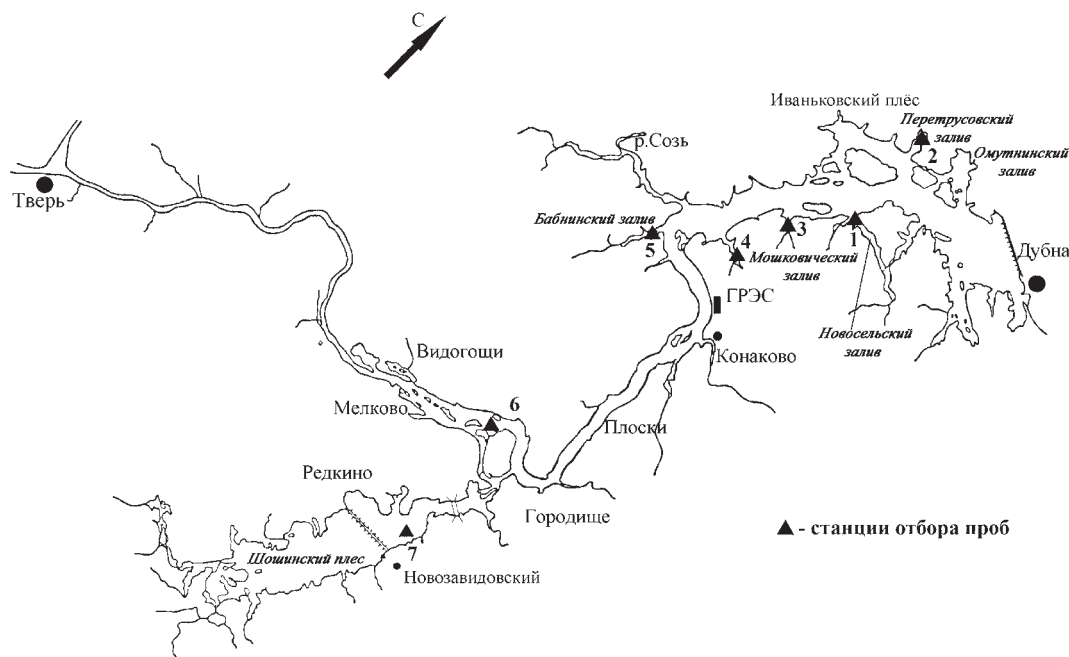


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб на Иваньковском водохранилище: 1 – Новосельский залив, 2 – Перетрусовский залив, 3 – Мал. Корчевской залив, 4 – Мошковический залив, 5 – Бабнинский залив, 6 – Волга-Низовка, 7 – Безбородово

Таблица 1. Содержание редкоземельных элементов в макрофитах и воде Иваньковского водохранилища

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Новосельский залив (N56°78.395', E36°93.148')														
манник водяной	31,000	85,000	5,000	31,000	1,000	4,000	1,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	1158,000	2532,000	273,000	1111,000	188,000	51,000	209,000	17,000	155,000	16,000	76,000	2,000	71,000	2,000
вода	0,084	0,191	0,022	0,098	0,020	0,012	0,020	0,003	0,017	0,002	0,009	0,001	0,023	0,007
Перетрусковский залив (N56°81.848', E36°98.170')														
манник водяной	46,000	109,000	6,000	37,000	3,000	11,000	5,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	767,000	1746,000	179,000	738,000	128,000	42,000	134,000	14,000	110,000	13,000	52,000	2,000	46,000	2,000
вода	0,109	0,268	0,031	0,130	0,027	0,013	0,029	0,004	0,023	0,003	0,011	0,002	0,021	0,005
Малый Корчевской залив (N56°78.887', E36°85.339')														
манник водяной	36,000	86,000	4,000	34,000	1,000	8,000	3,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	431,000	1008,000	103,000	430,000	81,000	35,000	89,000	7,000	66,000	6,000	32,000	2,000	23,000	2,000
вода	0,078	0,177	0,021	0,090	0,018	0,010	0,020	0,003	0,016	0,002	0,008	0,001	0,016	0,004
Мошковичский залив (N56°77.276', E36°78.552')														
манник водяной	87,000	191,000	18,000	83,000	13,000	7,000	14,000	7,000	10,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	1032,000	2337,000	252,000	1026,000	193,000	54,000	207,000	23,000	160,000	22,000	87,000	2,000	73,000	4,000
вода	0,049	0,102	0,013	0,054	0,011	0,009	0,012	0,002	0,011	0,001	0,005	0,001	0,013	0,003
Бабинский залив (N56°77.972', E36°71.322')														
манник водяной	9,000	24,000	3,000	4,000	1,000	2,000	1,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	788,000	1752,000	182,000	760,000	138,000	56,000	162,000	12,000	127,000	13,000	62,000	2,000	54,000	2,000
вода	0,076	0,172	0,020	0,088	0,017	0,010	0,019	0,003	0,016	0,002	0,008	0,001	0,013	0,003
Волга-Низовка (N56°64.951', E36°51.462')														
манник водяной	57,000	133,000	10,000	49,000	8,000	4,000	8,000	7,000	5,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
рдест пронзеннолистный	524,000	1156,000	120,000	491,000	90,000	35,000	107,000	7,000	80,000	8,000	38,000	2,000	34,000	2,000
вода	0,062	0,132	0,016	0,075	0,015	0,010	0,016	0,002	0,014	0,002	0,007	0,001	0,012	0,003
Безбородово (N56°59.560', E36°48.992')														
манник водяной	26,000	58,000	3,000	23,000	1,000	2,000	1,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	5,000
рдест пронзеннолистный	1365,000	3140,000	307,000	1219,000	233,000	70,000	243,000	22,000	200,000	27,000	97,000	6,000	88,000	6,000
вода	0,108	0,275	0,029	0,126	0,024	0,013	0,027	0,004	0,021	0,003	0,011	0,001	0,005	0,003
Фоновая концентрация для манника водяного	22,500	55,000	3,500	19,000	1,000	5,000	2,000	7,000	3,000	6,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Фоновая концентрация для рдеста пронзеннолистного	609,000	1380,000	142,000	595,000	109,000	45,000	125,000	9,500	96,000	9,500	47,000	2,000	38,000	2,000
Кларк речных вод, мкг/л [Соловов и др., 1990]	0,050	0,080	0,007	0,04	0,008	0,001	0,008	0,001	0,005	0,001	0,004	0,001	0,004	0,001

Примечание. Концентрации элементов в макрофитах приведены в мкг/кг сухой биомассы, в воде – в мкг/л.

Иваньковского водохранилища, характеризующихся различной антропогенной нагрузкой (рис. 1). Координаты станций опробования приведены в таблице 1.

Пробы воды отбирали с помощью батометра из поверхностного слоя. Объем пробы составлял 2 литра. Для получения растворенных форм РЗЭ пробы воды сразу после отбора фильтровали через мембранный фильтр «Владипор» с размером пор 0,45 мкм и подкисляли 0,5 мл $\text{HNO}_{3\text{конц.}}$ на каждые 15 мл пробы для последующего исследования методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС).

При опробовании макрофитов брали прикорневые части стебля с площадки 1×1 м, промывали под проточной водой, высушивали при комнатной температуре, измельчали в мельнице. Методом квадратования отбирали среднюю пробу. Пробы озоляли при 450°C 4,5 часа. Зольность образцов манника водяного в среднем составляла 9 %, рдеста – 17 %. Полученную золу разлагали под лампой в смеси концентрированных кислот ($\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$).

Определение содержаний РЗЭ в образцах поверхностных вод и в золе высшей водной растительности проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELEMENT-2 фирмы Thermo Scientific на кафедре геохимии геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Непосредственно перед измерениями на установке проводили подкисление проб и стандартных образцов азотной кислотой (HNO_3) до получения 3%-го раствора. В качестве внутреннего стандарта вводился индий (Indium ICP Standard CertiPUR 1002 мг/л $\pm 0,4$ %). Для консервации проб применялась азотная кислота квалификации ОСЧ, дважды прошедшая процедуру изопиестической перегонки. Методика исследования и метрологические характеристики анализа природных вод методом ИСП-МС подробно изложены в статье [Гришанцева и др., 2015]. Определение содержания Fe, Mn, Al, Ti в макрофитах также проводилось методом ИСП-МС.

Пределы обнаружения элементов в анализируемом растворе по 3- δ критерию ($\text{ПО} = C_{\text{ф}} + 3\delta$, где $C_{\text{ф}}$ – среднее значение фона эталонов, используемых для построения градуировочных графиков, δ – относительное среднеквадратичное отклонение измерений) (в нг/л): для La – 0,1; Ce – 0,07; Pr – 0,03; Nd – 1,1; Sm – 0,04; Eu – 0,2; Gd – 0,09; Tb – 0,04; Dy – 0,06; Ho – 0,07; Er – 0,04; Tm – 0,02; Yb – 0,02; Lu – 0,03. Величина относительного стандартного отклонения (S_r) изменяется от

0,1 до 10 % в зависимости от области измерения концентрации.

Контроль полноты разложения образцов золы растений и оценка правильности результатов анализа методом ИСП-МС проводились по Государственным стандартным образцам: стандартный образец состава элодеи канадской (ЭК-1), стандартный образец состава листа березы (ЛБ-1), стандартный образец состава травосмеси (Тр-1) (табл. 2).

Математическая обработка аналитических данных проводилась с применением корреляционного и факторного методов с помощью пакета программ «GOLD-геохимик 2.0» (автор Воробьев С. А.) [Воробьев, 2016].

Результаты и обсуждение

Полученные данные по составу растворенных форм редкоземельных элементов в воде Иваньковского водохранилища отличаются от кларков РЗЭ природных вод более высокими значениями, которые связаны с региональными геохимическими особенностями состава пород территории водосбора Иваньковского водохранилища (табл. 2).

Сравнение полученных аналитических данных о содержании РЗЭ, Fe, Mn, Al и Ti в макрофитах Иваньковского водохранилища показывает, что концентрации элементов в каждом из исследованных видов макрофитов варьируют незначительно (табл. 1 и 3). Ряд средних значений содержания РЗЭ в маннике водяном имеет вид $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Tb} \geq \text{Pr} > \text{Ho} > \text{Eu} > \text{Gd} > \text{Dy} > \text{Sm} > \text{Er} \geq \text{Tm} \geq \text{Yb} \geq \text{Lu}$. Для рдеста пронзеннолистного ряд средних значений содержания РЗЭ имеет несколько иной вид: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Pr} > \text{Gd} > \text{Sm} > \text{Dy} > \text{Er} > \text{Yb} > \text{Eu} > \text{Ho} > \text{Tb} > \text{Lu} > \text{Tm}$. Но основная закономерность накопления РЗЭ водными растениями сохраняется: наиболее активно вовлекаются в биогеохимические процессы в макрофитах обеих экологических групп легкие редкоземельные элементы (Ce, La, Nd, Pr), а наименее активно – Tm и Lu.

Однако концентрации РЗЭ в макрофитах двух исследованных групп достаточно сильно отличаются друг от друга. Рдест пронзеннолистный накапливает большие количества РЗЭ по сравнению с манником водяным. Например, средние концентрации La, Ce, Nd, Sm, Gd, Er, Dy, Yb, Pr для формации рдеста пронзеннолистного превосходят средние концентрации для манника в 20–30 раз; Eu – в 10 раз; Tb, Tm, Ho, Lu – в 2 раза. Такая же закономерность была получена нами ранее для тяжелых металлов и ряда макрокомпонентов [Гришанцева и др., 2010]. Это можно объяснить

Таблица 2. Сравнение полученных методом ИСП-МС и аттестованных значений концентраций для ГСО

Элемент	ГСО элодеи канадской ЭК-1, мг/кг			ГСО лист березы ЛБ-1, мг/кг			ГСО травосмесь Тр-1, мг/кг		
	найдено	аттестовано	δ_x	найдено	аттестовано	δ_x	найдено	аттестовано	δ_x
La	1,92	2,05	6	0,79	0,82	4	0,24	0,26	8
Ce	3,41	3,40	0,3	1,45	1,50	3	0,46	0,50	8
Pr	0,41	0,42	2	0,18	0,19	5	0,05	0,06	17
Nd	1,56	1,59	2	0,71	0,69	3	0,21	0,22	4,5
Sm	0,27	0,31	13	0,12	0,13	8	0,03	0,04	25
Gd	0,31	0,35	11	0,15	0,15	0	0,04	0,05	20
Dy	0,24	0,36	33	0,12	0,12	0	0,03	0,04	25

Примечание. Содержания остальных РЗЭ в ГСО не аттестованы; δ_x – относительная погрешность измерения.

Таблица 3. Содержание Mn, Fe, Al, Ti в макрофитах Иваньковского водохранилища

	Mn	Fe	Al	Ti
Новосельский залив				
манник водяной	277,78	120,03	50,52	6,98
рдест пронзеннолистный	720,21	1344,07	2054,22	113,20
Перетрусовский залив				
манник водяной	351,29	136,99	71,40	5,85
рдест пронзеннолистный	1730,98	797,59	1108,88	64,52
Малый Корчевской залив				
манник водяной	377,35	183,56	57,30	5,28
рдест пронзеннолистный	1038,54	618,05	724,96	36,86
Мошковичский залив				
манник водяной	122,10	298,47	144,01	8,82
рдест пронзеннолистный	1671,15	1404,42	1768,79	90,73
Бабнинский залив				
манник водяной	154,63	102,05	17,06	3,59
рдест пронзеннолистный	950,97	1063,22	1229,75	66,68
Волга-Низовка				
манник водяной	296,66	213,45	107,95	8,60
рдест пронзеннолистный	535,66	821,19	913,24	49,66
Безбородово				
манник водяной	352,72	122,61	43,59	4,41
рдест пронзеннолистный	1500,86	2062,36	2378,97	126,74

Примечание. Концентрации элементов в макрофитах приведены в мг/кг сухой биомассы.

физиологическими и морфологическими особенностями макрофитов группы погруженных в воду растений, которые задерживают взвесь из природных вод на стеблях и листьях и выщелачивают из нее микро- и макроэлементы. В работе [Куриленко, 2007] подобный факт объясняется большой функциональной востребованностью Fe и Mn в процессах фотосинтеза, а также наличием у погруженных видов водных растений механизмов комплексирования и детоксикации ионов металлов, позволяющих накапливать металлы в избыточных концентрациях по «безбарьерному» типу. Избыточное накопление микроэлементов макрофитами группы погруженных растений, предположительно, объясняется физиологической потребностью в этих элементах, а также необходимостью формирования

устойчивого каркаса для обеспечения жизненных функций в условиях активного гидродинамического режима произрастания видов этой экологической группы.

Близость концентраций, полученных нами для рдеста пронзеннолистного из Иваньковского водохранилища, к аттестованным концентрациям РЗЭ в элодее канадской (ГСО ЭК-1) говорит не только о достоверности полученных результатов, но и о том, что содержание РЗЭ в макрофитах данной экологической группы является видовым признаком и определяется физиологическими потребностями данной группы организмов. Рдест пронзеннолистный и элодея канадская принадлежат к одной экологической группе макрофитов – укореняющиеся гидрофиты.

В качестве фоновых участков были выбраны Бабнинский и Малый Корчевской заливы, которые удалены от крупных источников загрязнения и населенных пунктов. По данным о содержании РЗЭ в макрофитах этих заливов были рассчитаны фоновые значения концентраций РЗЭ в маннике водяном и рдесте пронзеннолистном (табл. 1). Пространственное распределение РЗЭ в ВВР Ивановского водохранилища довольно однородно. Имеется лишь несколько локальных максимумов в ВВР и воде Мошковического залива и залива у створа Безбородово. Особенно ярко эти максимумы проявляются для рдеста пронзеннолистного. Сравнение данных, полученных для районов, испытывающих различную антропогенную нагрузку, показало, что в местах сброса сточных вод макрофиты характеризуются более высоким содержанием РЗЭ. Так, в Мошковическом заливе, месте сброса сточных вод Конаковской ГРЭС и коммунальных сточных вод г. Конаково, манник водяной содержит более высокие концентрации La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, в среднем превышающие принятые фоновые значения от 2 до 7 раз. Содержание большинства РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb) в рдесте пронзеннолистном из Мошковического залива также характеризуется значениями, превышающими фоновые в 2 раза. Это свидетельствует о техногенном поступлении РЗЭ в составе поверхностного стока с промплощадок КГРЭС, который перехватывается водно-болотными

растениями. Редкоземельные элементы, поступающие в составе промстоков, поглощаются и накапливаются погруженными видами макрофитов. Можно сделать вывод о том, что в Мошковический залив РЗЭ поступают как с поверхностным неконтролируемым стоком, что приводит к их накоплению растениями группы водно-болотных макрофитов, так и в составе жидких промстоков, что влечет за собой увеличение содержания РЗЭ в погруженных видах макрофитов.

Станция Безбородово расположена ниже по течению от места сброса сточных вод Редкинского опытного завода, производителя химической продукции для предприятий авиационной и космической промышленности, вблизи железной дороги Москва – Санкт-Петербург. Рдест пронзеннолистный из этого створа характеризуется высоким содержанием большинства РЗЭ, которое в среднем в 2 раза превосходит фоновые значения. Манник водяной характеризуется в этом створе фоновыми концентрациями, что может свидетельствовать о поступлении РЗЭ в составе промстоков и отсутствии плоскостного смыва, как антропогенного источника поступления РЗЭ в экосистему Ивановского водохранилища.

По результатам корреляционного и факторного математического анализа аналитических данных выявлена высокая положительная корреляционная связь между содержанием большинства РЗЭ с Fe и Al для рдеста

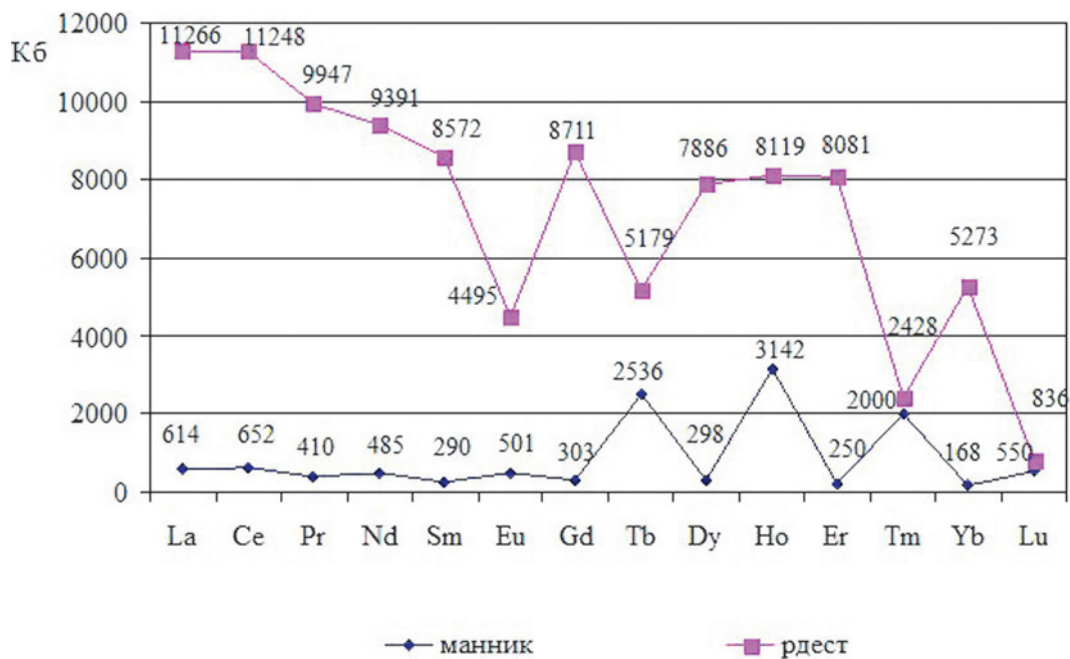


Рис. 2. Средние значения коэффициентов биологического поглощения редкоземельных элементов (K_b) в маннике водяном и рдесте пронзеннолистном относительно воды Ивановского водохранилища

пронзеннолистного. Для манника водяного высокая положительная корреляционная связь получена для Fe и Al с группой легких редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm). С Mn получены отрицательные значения коэффициентов корреляции и для манника и для рдеста. Это дает основание полагать, что в геохимических процессах совместная миграция РЗЭ происходит в составе оксигидроксидов и органоминеральных коллоидов Fe и Al. Совместная миграция и сопряженность биогеохимических циклов РЗЭ, Fe и Al в системе «вода – взвесь – высшие водные растения» особенно четко проявляется для группы погруженных растений.

Для выявления биогеохимических особенностей накопления РЗЭ макрофитами и оценки интенсивности вовлечения РЗЭ в биогеохимические циклы миграции не только рассматривались абсолютные концентрации РЗЭ в различных видах водных растений, но и проводился расчет коэффициентов биологического поглощения (K_b) редкоземельных элементов. Коэффициенты биологического поглощения (K_b) РЗЭ в макрофитах Ивановского водохранилища рассчитывались как отношение концентрации химического элемента в растениях (в мг/кг сухой биомассы) к его концентрации в воде (мг/л). На рисунке 2 приведены полученные коэффициенты биологического поглощения РЗЭ макрофитами Ивановского водохранилища. Для всех редкоземельных элементов K_b достигали максимальных значений у рдеста пронзеннолистного. Максимальные коэффициенты биологического поглощения РЗЭ были получены для манника водяного и рдеста пронзеннолистного, произрастающих в Мошковском заливе. Сравнение коэффициентов биологического поглощения РЗЭ для рдеста пронзеннолистного из группы погруженных видов макрофитов и K_b тяжелых металлов (Zn, Cu, Cr, Ni, Pb) для двух видов погруженных макрофитов (элодея и роголистник) [Куриленко, 2007] показало их большое сходство, что говорит об активном участии РЗЭ в биогеохимических процессах и выраженной высокой степени биоаккумуляции. Это позволяет использовать K_b для выявления и сравнительного анализа антропогенного поступления РЗЭ в водные экосистемы.

Заключение

Впервые проведенные исследования РЗЭ в экосистеме Ивановского водохранилища позволили определить уровни содержания РЗЭ для двух видов макрофитов из разных экологических групп – манника водяного из группы

гелофитов – водно-болотных растений и рдеста пронзеннолистного из группы гидрофитов – погруженных в воду растений, а также установить фоновые концентрации редкоземельных элементов в макрофитах Ивановского водохранилища. Максимальные значения содержания РЗЭ получены для рдеста пронзеннолистного из группы погруженных растений. Это связано с физиологическими и морфологическими особенностями растений данной экологической группы, их способностью удерживать взвесь из воды и выщелачивать из нее РЗЭ.

Повышенное содержание РЗЭ в ВВР вблизи сбросов сточных вод промышленных предприятий свидетельствует о локальном загрязнении отдельных заливов Ивановского водохранилища РЗЭ и, следовательно, о необходимости контроля содержания РЗЭ в биотических и абиотических компонентах экосистемы водохранилища.

Исследованные виды водных растений могут быть рекомендованы для использования в качестве биоиндикаторов при эколого-геохимических исследованиях и биогеохимическом мониторинге. Они отвечают важнейшим требованиям, предъявляемым к организмам-индикаторам. Оба вида широко распространены в пределах Ивановского водохранилища и реагируют на изменение содержания РЗЭ в природных водах повышенным накоплением элементов в широком интервале концентраций. Водно-болотные виды макрофитов перехватывают РЗЭ, поступающие с плоскостным смывом от неконтролируемых источников, в то время как погруженные виды накапливают РЗЭ, поступающие непосредственно в водную среду со сточными водами.

По результатам корреляционного анализа установлен факт совместной миграции РЗЭ, Fe и Al в экосистеме Ивановского водохранилища в составе оксигидроксидов и органоминеральных коллоидов Fe и Al. Совместная миграция и сопряженность биогеохимических циклов РЗЭ, Fe и Al в системе «вода – высшие водные растения» особенно четко проявляется для группы погруженных растений (гидрофитов).

Проведенные исследования показывают, что РЗЭ проявляют большую активность в биогеохимических процессах, участвуют в биогеохимических циклах в водных экосистемах, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов биологического поглощения водными растениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00542).

Литература

Абакумова В. А., Ахметьева Н. П., Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н., Волкова Э. В., Гашкина Н. А., Григорьева И. Л., Казмирук В. Д., Казмирук Т. Н., Кирпичникова Н. В., Кочарян А. Г., Кременецкая Е. Р., Обридко С. Л., Перекальский В. М., Сафронова К. И., Федорова Л. П., Штригер Е. А. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.

Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.

Баренбойм Г. М., Авандеева О. П. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. 2014. № 5(71). С. 42–55.

Воробьев С. А. Информатика. Математическая обработка геолого-геохимических данных. Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2016. 266 с.

Гришанцева Е. С., Сафронова Н. С. Эколого-геохимическая оценка состояния Волжского источника водоснабжения г. Москвы // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 3. С. 304–322.

Гришанцева Е. С., Сафронова Н. С., Бычков А. Ю., Пухов В. В., Тютюнник О. А. Определение редких и редкоземельных элементов в придонных, поровых и поверхностных водах Ивановского водохрани-

лища методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Вода: химия и экология. 2015. № 7. С. 65–73.

Гришанцева Е. С., Сафронова Н. С., Кирпичникова Н. В., Федорова Л. П. Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Ивановского водохранилища // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2010. № 3. С. 223–231.

Дубинин А. В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: в 6 кн., справочник / Ред. Э. К. Буренков. М.: Недра, 1997. 607 с.

Куриленко В. В., Осмоловская Н. Г. Биоиндикаторная роль высших растений при диагностике загрязнений водных экосистем на примере малых водоемов г. Санкт-Петербурга // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 6. С. 757–764.

Соловов А. П., Архипов А. Я., Бугров В. А., Воробьев С. А., Гершман Д. М., Григорян С. В., Киятовский Е. М., Матвеев А. А., Мильяев С. А., Николаев В. А., Перельман А. И., Шваров Ю. В., Юфа Б. Я., Ярошевский А. А. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 335 с.

Поступила в редакцию 21.11.2016

References

Abakumova V. A., Akhmet'eva N. P., Brekhovskikh V. F., Vishnevskaya G. N., Volkova E. V., Gashkina N. A., Grigor'eva I. L., Kazmiruk V. D., Kazmiruk T. N., Kirpichnikova N. V., Kocharyan A. G., Kremenetskaya E. R., Obridko S. L., Perekal'skii V. M., Safronova K. I., Fedorova L. P., Shtriter E. A. Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy okhrany [The Ivan'kovskoye Reservoir: current state and problems of protection]. Moscow: Nauka, 2000. 344 p.

Balashov Yu. A. Geokhimiya redkozemel'nykh elementov [Geochemistry of rare-earth elements]. Moscow: Nauka, 1976. 267 p.

Barenboim G. M., Avandeeva O. P. Redkozemel'nye elementy v vodnykh ob'ektakh (ekologicheskie aspekty) [Rare-earth elements in water bodies (environmental aspects)]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2014. No. 5(71). P. 42–55.

Dubin A. V. Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v okeane [Geochemistry of rare-earth elements in the ocean]. Moscow: Nauka, 2006. 360 p.

Grishantseva E. S., Safronova N. S. Ecologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya Volzhskogo istochnika vodosnabzheniya g. Moskvy [Ecological and geochemical assessment of the Volga source of water supply to Moscow]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2012. Vol. 39, no. 3. P. 305–321.

Grishantseva E. S., Safronova N. S., Bychkov A. Yu., Pukhov V. V., Tyutyunnik O. A. Opredelenie redkikh i redkozemel'nykh elementov v pridonnykh, porovykh i poverkhnostnykh vodakh Ivan'kovskogo vodokhranilishcha metodami atomno-émissionnoi i mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoi plazmoi

[Rare and rare-earth elements determination in bottom, pore and surface waters of the Ivankovskoye Reservoir using atomic emission and mass spectrometry with inductively coupled plasma]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2015. No. 7. P. 65–73.

Grishantseva E. S., Safronova N. S., Kirpichnikova N. V., Fedorova L. P. Raspredelenie mikroelementov v vysshei vodnoi rastitel'nosti Ivan'kovskogo vodokhranilishcha [Distribution of microelements in higher aquatic plants of the Ivankovskoye Reservoir]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology]. 2010. No. 3. P. 223–231.

Ivanov V. V. Ekologicheskaya geokhimiya elementov: v 6 kn., spravochnik [Ecological geochemistry of elements. Reference book in 6 vol.]. Ed. E. K. Burenkov. Moscow: Nedra, 1997. 607 p.

Kurilenko V. V., Osmolovskaya N. G. Bioindikatornaya rol' vysshikh rastenii pri diagnostike zagryaznenii vodnykh ekosistem na primere mal'nykh vodoemov g. Sankt-Petersburga [Bioindicator role of higher plants for diagnostics of aquatic ecosystems contamination (case of small water bodies in St. Petersburg)]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 6. P. 757–764.

Solovov A. P., Arkhipov A. Ya., Bugrov V. A., Vorob'ev S. A., Gershman D. M., Grigoryan S. V., Kiyatovskii E. M., Matveev A. A., Milyaev S. A., Nikolaev V. A., Perel'man A. I., Shvarov Yu. V., Yufa B. Ya., Yaroshevskii A. A. Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh [Reference book of

geochemical prospecting for minerals]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

Vorob'ev S. A. Informatika. Matematicheskaya obrabotka geologo-geokhimicheskikh dannykh [Computer science. Mathematical processing of geological and

geochemical data]. Barnaul: IP Kolmogorov I. A., 2016. 266 p.

Received October 21, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Гришанцева Елена Сергеевна

научный сотрудник кафедры геохимии
Геологического факультета, к. г.-м. н.
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: SHES99@mail.ru

Бычков Андрей Юрьевич

доцент кафедры геохимии Геологического факультета,
д. г.-м. н., проф.
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: bychkov@geol.msu.ru

Шурупова Светлана Андреевна

студентка Геологического факультета
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: wave.shurup@mail.ru

Федорова Людмила Парамоновна

старший научный сотрудник
Государственный научно-исследовательский институт
озерного и речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ),
Верхне-Волжское отделение
ул. Гагарина, 14, Конаково, Тверская область,
Россия, 171253
эл. почта: ludmila-54f@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Grishantseva, Elena

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: shes99@mail.ru

Bychkov, Andrey

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: bychkov@geol.msu.ru

Shurupova, Svetlana

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: wave.shurup@mail.ru

Fedorova, Ludmila

Berg State Research Institute on Lake and River Fisheries
"GosNIORH", Verkhne-Volzhskoe Division
14 Gagarin St., 171253 Konakovo, Tver Region, Russia
e-mail: ludmila-54f@mail.ru

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 556

СВЯЗЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ, ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ РЕЛЬЕФА И ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

**Е. И. Игнатов^{1,2}, Е. В. Борщенко², А. Л. Загоскин¹, И. В. Землянов²,
А. Ю. Санин^{1,2}, П. Н. Терский^{1,2}, М. О. Фатхи^{1,2}**

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

² *Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Москва*

В работе отражены методы исследований, позволившие произвести типизацию и районирование побережий Онежского озера, разработать морфогенетическую классификацию его берегов, а также выявить унаследованные связи истории развития рельефа региона и современной динамики берегов Онежского озера в условиях разнообразной хозяйственной деятельности человека. Проведено обобщение имеющихся фондовых и литературных материалов, в том числе специализированных и общегеографических карт, а также данных дистанционного зондирования. Проанализированы результаты проведенных в течение 2014–2015 гг. полевых исследований на 18 ключевых участках, представляющих большинство районов побережья Онежского озера, в том числе и все участки с высокой степенью антропогенной нагрузки. На суше и на подводном береговом склоне выполнено георадиолокационное (георадарное) и акустическое профилирование, что позволило уточнить строение чехла рыхлых отложений, а в некоторых случаях и его мощность. Поверхность дна изучалась при помощи подводной фотосъемки и гидролокации бокового обзора. Выделено семь типов берегов и показано их пространственное распространение, а также типы побережий, охарактеризованы входящие в них районы. Разработаны рекомендации в связи с хозяйственным использованием человеком для каждого типа берега с учетом их динамики, в частности, соотношения абразионных и аккумулятивных процессов. Материалы данной статьи были представлены в Петрозаводске в рамках V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) – «Water Resources: Research and Management» (WRRM) 5 сентября 2016 года в виде устного доклада.

Ключевые слова: Онежское озеро; донные отложения; морфогенетические типы побережий и берегов; георадиолокационное профилирование; подводная фотосъемка; абразионные и аккумулятивные процессы; природопользование.

E. I. Ignatov, E. V. Borshchenko, A. L. Zagoskin, I. V. Zemlyanov, A. Yu. Sanin, P. N. Terskiy, M. O. Fathi. CONNECTION BETWEEN THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF LAKE ONEGO REGION, ITS TOPOGRAPHIC EVOLUTION AND THE DYNAMICS OF THE LAKE SHORES

The article deals with research methods, which have permitted to classify the coasts of Lake Onego, develop a morphogenetic classification of the coasts, and to identify the inherited connections of the history of the region's topographic development and the current dynamics of Lake Onego shores as related to a variety of human activities. The various materials of previous researches, including specialized and general geographical maps, and remote sensing data have been analyzed as well as the results of field research in 18 key areas. The research took place in 2014–2015, the key areas represent a majority of regions of Lake Onego coasts, including all sites exposed to heavy human pressure. Ground penetrating radar (GPR) and acoustic profiling was used on the surface and on underwater coastal slope, which allowed to specify the thickness of loose Quaternary deposits (it ranges from several meters to dozens of meters), to identify strata and determine their number. The bottom was investigated by underwater photography and side-scan sonar surveys. Seven types of coast and their spatial distribution have been determined. Recommendations in relation to human use have been formulated for each type of coast. An oral presentation of the material contained in this article was made in Petrozavodsk at the 5th International young scientists conference "Water Resources: Research and Management" (WRRM) (Limnological school-practice) on September 5, 2016.

Keywords: Lake Onego; bottom sediments; morphogenetic types of coasts and shores; GPR profiling; underwater photography; abrasion and accumulation processes; land use.

Введение

Онежское озеро, одно из крупнейших озер Карелии, играет огромную роль в развитии промышленно-хозяйственного и рекреационно-туристического потенциала этого региона, водохозяйственного обеспечения прибрежных городов и населенных пунктов, а также воднотранспортных связей между Белым и Балтийским морями. В настоящее время главной проблемой природопользования является водоснабжение населения и промышленных объектов чистой водой и сохранение озера как резервуара запасов чистой воды для использования будущими поколениями. Однако современное состояние акватории Онежского озера, его берегов и водосборного бассейна находится в критическом положении по ряду морфогенетических и экологических признаков.

В настоящее время в результате изменения уровня Онежского озера и активизации интенсивности хозяйственной деятельности (в том числе рекреационной) возрастает актуальность типизации берегов Онежского озера и изучения их динамики, на которую оказывают влияние как природные, так и антропогенные факторы. Характер изменения берегов определяется морфометрическими характеристиками берега и подводного берегового склона, интенсивностью волнения, зависит от

геологического строения региона и истории развития его рельефа.

Обзор предыдущих исследований

Большинство предшествующих исследований концентрировались либо на смежной с Онежским озером территории суши, либо на изучении дна Онежского озера, определении особенностей строения донных отложений водоема. Последним, в частности, занимались Н. И. Семенович [1973], Д. Д. Квасов [История..., 1990] и А. А. Макарьев с коллегами [Геологическая съемка..., 2002], Д. А. Субетто [Субетто, 2009; Субетто, Прыткова, 2016] и др. Онежскому озеру посвящено меньшее количество исследований в сравнении с Ладожским. Тем не менее донные отложения и прилегающая территория (ее физико-географические особенности, геологическое строение, четвертичные отложения) изучены с достаточной степенью детализации, которая была достигнута в ходе многих проведенных в разные годы полевых исследований, подчас весьма трудоемких. Так, в ходе работ, организованных Н. И. Семеновичем [1973], на каждую 1000 квадратных километров поверхности озера было установлено 35 станций. В ходе исследований, организованных в 2014–2015 гг. ГОИН им. Н. Н. Зубова, для достижения поставленных целей донные отложения изучены в пределах ключевых участков [Исследование..., 2015].

Наибольшее внимание в предшествующих работах уделено ледниковому рельефу, что объясняется его преобладанием в водосборе Онежского озера. Однако береговой рельеф и типы берегов, а также их эволюция, динамика и прогноз развития изучены слабо или вообще не отражены в научной литературе. А вопросы, связанные с берегоукреплением и хозяйственным использованием берегов, требуют особого изучения, что обуславливает актуальность данного исследования.

Цель работы: выявить унаследованные связи между природными характеристиками, геологическим строением и историей развития побережья и современной динамикой берегов Онежского озера.

Задачи исследования:

1. Проанализировать результаты, полученные в ходе проведенных полевых исследований, в частности, уточнить литературные данные о донных отложениях в прибрежной акватории на ключевых участках.
2. Произвести типизацию и районирование побережий Онежского озера на морфогенетической основе в связи с особенностями геологического строения и литофациальным составом четвертичных отложений, а также унаследованным состоянием современного рельефа прибрежной территории.
3. Изучить морфологию и динамику берегов Онежского озера.
4. Выделить морфогенетические типы берегов Онежского озера.
5. Оценить берега Онежского озера по актуальности берегоукрепительных работ в зависимости от вида их хозяйственного использования.

Материалы и методы

В исследовании использованы:

- фондовые и опубликованные литературные данные;
- материалы полевых работ, проведенных авторами;
- топографические, тематические (геологические, четвертичных отложений, геоморфологические и т. д.) и навигационные карты различного масштаба;
- данные дистанционного зондирования Земли.

Методы исследования:

- сравнительно-географический, сопоставление различных районов побережья Онежского озера и типов берегов;



Рис. 1. Ключевые участки, на которых авторами проводились экспедиционные и стационарные мониторинговые исследования

- картографический;
- метод географических обобщений;
- метод полевых исследований и наблюдений;
- географическое районирование на основе системного подхода;
- метод ключевых участков (ключей).

Ключевые участки, выбранные для данного исследования (рис. 1), представляют собой фрагменты берегов с различной степенью антропогенного освоения. К ним относятся кутовые части бухт, в которых расположены Петрозаводск, Медвежьегорск и другие города и поселки, а также участки береговой зоны, подверженные наиболее активным динамическим изменениям.

Районом исследования являются берега и побережья Онежского озера, но детальными полевыми работами авторов пока практически не охвачен Заонежский полуостров и частично восточное побережье Онежского озера, хотя уникальность берегов и прибрежных ландшафтов указанных территорий не подлежит сомнению, как и необходимость их учета для типизации берегов Онежского озера и рельефа региона. Для них, в силу отсутствия собственных данных, на настоящем этапе работы авторы использовали фондовые материалы



Рис. 2. Результаты подводной съемки и сонограмма для бухты Рыбрека. Слева – сонограмма, на которой прослеживаются валуны (галька в таком масштабе неразличима). Справа – фотографическое изображение дна, в частности мелких валунов и гальки

и литературные сведения. Тем более что об этих районах имеется материал с достаточно высокой степенью детализации, обобщенный в результатах предшествующих исследований [Филимонова, Лаврова, 2015; и др.]. Таким образом, результаты, представленные в настоящей статье, получены как на основе полевых исследований, так и за счет анализа фондового и литературного материала, который имел огромное значение для решения поставленных задач.

Одним из наиболее значимых этапов полевых работ стало геолого-геофизическое обследование берегов и подводного берегового склона озера. Оно включало в себя два основных типа работ: исследование структуры поверхности дна при помощи структурного сканера Lowrance StructureScan LSS-1 и подводную фото- и видеосъемку. Структурный сканер позволяет получить визуальную информацию о структуре поверхности дна с возможностью оценки линейных размеров находящихся там объектов, а фотоснимки – определить генезис и состав слагающего дно материала и объектов на дне.

В процессе движения приборный комплекс создавал сонограмму, включавшую в себя визуальную информацию о структуре дна в зоне прохождения судна, а также данные геопозиционирования. Пример сонограммы для бухты Рыбрека, совмещенной с результатами подводной фотосъемки, приводится на рисунке 2. Такое же сопоставление было проведено для всех остальных ключевых участков.

Фотоснимки позволяют непосредственно наблюдать разнообразие донных грунтов – их состав, крупность, характер сложения и степень покрытости наилком, а сонограмма – характер

их залегания и текстуру сложения на участках большой площади, а также инородные объекты, которые могут косвенно свидетельствовать об интенсивности и направленности процессов переформирования дна на подводном береговом склоне.

Например, сплошные песчаные донные отложения с выраженными микроформами рельефа (рифелями) свидетельствуют о процессах аккумуляции влекомых наносов на подводном береговом склоне. Скопление затонувших бревен (оставшихся от лесосплава) на валунной отмостке, покрытых наилком, иллюстрирует относительно стабильное состояние подводного берегового склона с выраженными сезонными седиментационными процессами. Пример результатов подводной съемки приводится на рисунке 3.

Разнообразие донных грунтов в обобщенном виде отражено на картах, составленных ранее [Семенович, 1973; Макарьев и др., 2002; Исследование..., 2015; и др.].

Примененная методика исследований, равно как и полученный опыт работы с задействованным оборудованием, могут быть использованы для будущих работ на Онежском озере и других акваториях.

Для изучения новейших отложений на ключевых участках проведено «георадарное» (георадиолокационное) профилирование верхних слоев осадка на суше до глубины 4–5 метров, а также донных отложений на подводном береговом склоне до этих же глубин. Также было осуществлено профилирование прибрежной зоны суши и подводного берегового склона с использованием профилографа. Приборная база – георадар ОКО-2, акустический профилограф Knudsen 3214 Chirp.

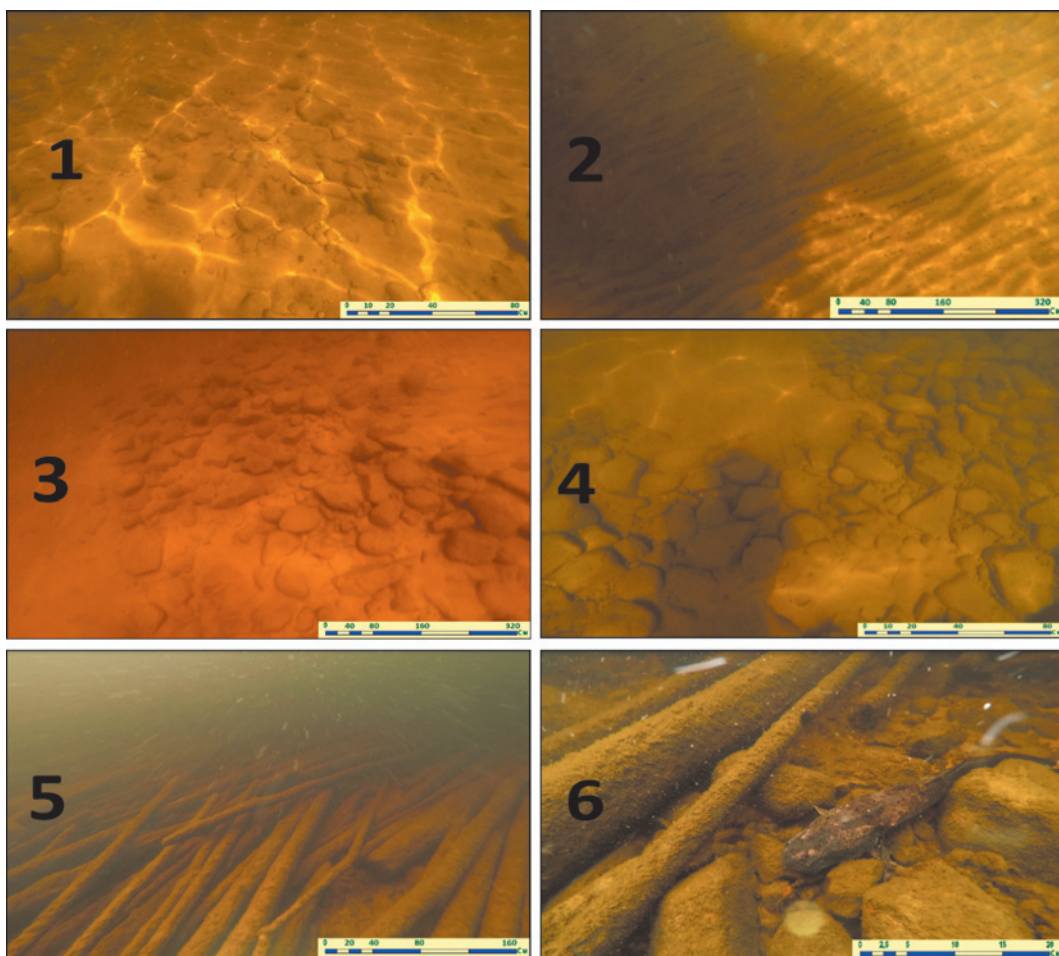


Рис. 3. Некоторые результаты применения подводной съемки: 1 – устье реки Водла, песчано-галечный грунт; 2 – губа Большая, песчаный грунт, рифели; 3 – бухта Рыбрека, галька, мелкие валуны, песок; 4 – бухта Гиморецкая, галька, мелкие валуны, песок; 5 – акватория около поселка Кварцитный, затонувшие бревна; 6 – акватория около поселка Каскесручей, крупные валуны, затонувшие бревна

Однако в связи с трудоемкостью вышеупомянутых полевых исследований для определения мощности донных отложений используются косвенные методы и анализ фондовых материалов, содержащих в том числе и данные по бурению в различных частях исследуемого региона. Их применение представляется целесообразным для обладающего уникальными физико-географическими характеристиками побережья восточной и северной части Онежского озера (в частности Заонежский полуостров), слабо охваченного полевыми исследованиями.

Результаты и обсуждение

Анализ литературных и фондовых материалов показывает, что большая часть берегов Онежского озера сложена устойчивыми к абразионным процессам докембрийскими кристаллическими

породами, как правило, скрытыми чехлом четвертичных осадочных отложений. В южной части кристаллический фундамент имеет палеозойский возраст, четвертичные отложения отличаются несколько большей мощностью и разнообразием. На побережье северной части Онежского озера в ряде случаев кристаллический фундамент обнажается либо он прикрыт маломощным слоем четвертичных отложений. Здесь, по сути, сочетаются два разных генетических типа рельефа: формы, сложенные кристаллическими породами, и формы, сложенные породами четвертичного возраста. Первые распространены в западной части, где сформировался типичный сельговый денудационно-тектонический рельеф [Филимонова, Лаврова, 2015], покров четвертичных отложений часто отсутствует. В восточной и южной части полуострова расположена моренная полого-холмистая местами друмлинизированная равнина. Разная устойчивость

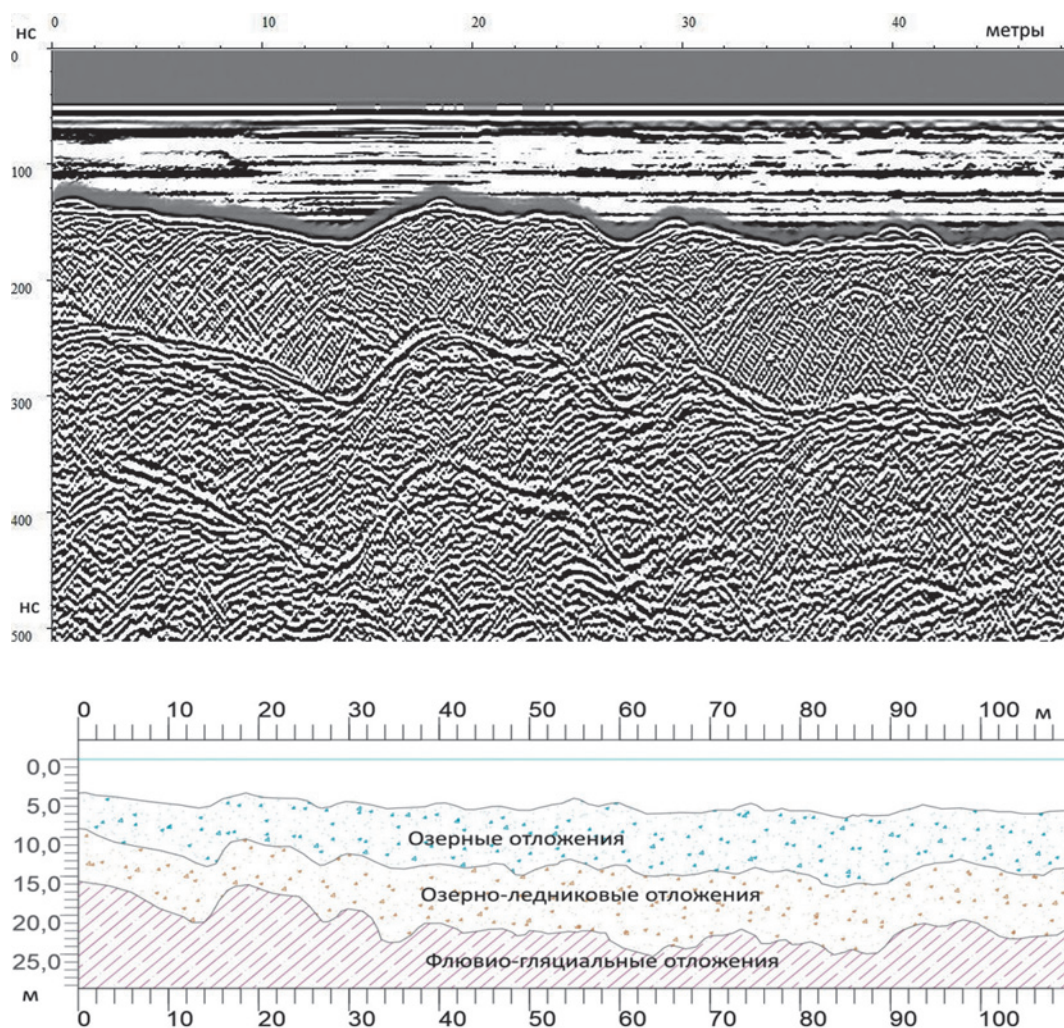


Рис. 4. Пример георадарного профиля пляжа (фрагмент) и его интерпретация. Исполнитель: Загоскин А. Л. Местоположение профиля: мыс Андомский

горных пород к выветриванию и характер дизъюнктивных нарушений привели к значительным разбросам относительных высот форм рельефа на небольших площадях. Разнообразие рельефа увеличивает рекреационную привлекательность территории в сочетании с имеющимися культурными и историческими памятниками.

В последнее время для решения целого ряда как теоретических, так и прикладных задач все чаще применяется георадиолокационное зондирование. Оно позволяет на небольших глубинах до 15–20 метров в пресноводных бассейнах или на суше изучить строение верхней части чехла четвертичных пород до глубины 5–7 метров и более или до цоколя кристаллического фундамента (см. рис. 4).

В ряде случаев такой способ удобнее применяемого для подобных исследований сейсмоакустического метода, использование которого часто малоэффективно или вовсе невозможно [Старовойтов и др., 2016].

В результате георадиолокационного и акустического профилирования, которое осуществлено на большинстве ключевых участков (см. рис. 1), выявлено, что наиболее часто в пределах верхних 4–5 метров отложений фиксировались два-три их типа, часто различных по генезису. Иногда типов отложений было больше, либо менее чем в 5 метрах от поверхности фиксировался цоколь коренных пород. Положение границ между разными типами отложений и их мощность изменяется как в пределах отдельно взятого профиля, так и от профиля к профилю, даже если они расположены близко друг к другу. Смена отложений во многих случаях происходит как по глубине, так и по длине профиля. Разнообразие типов отложений объясняется сложной голоценовой и доголоценовой историей развития рельефа региона.

Профилирование показало, что мощность пляжевых отложений обычно невелика – не более 0,5 метра (за исключением дюнных

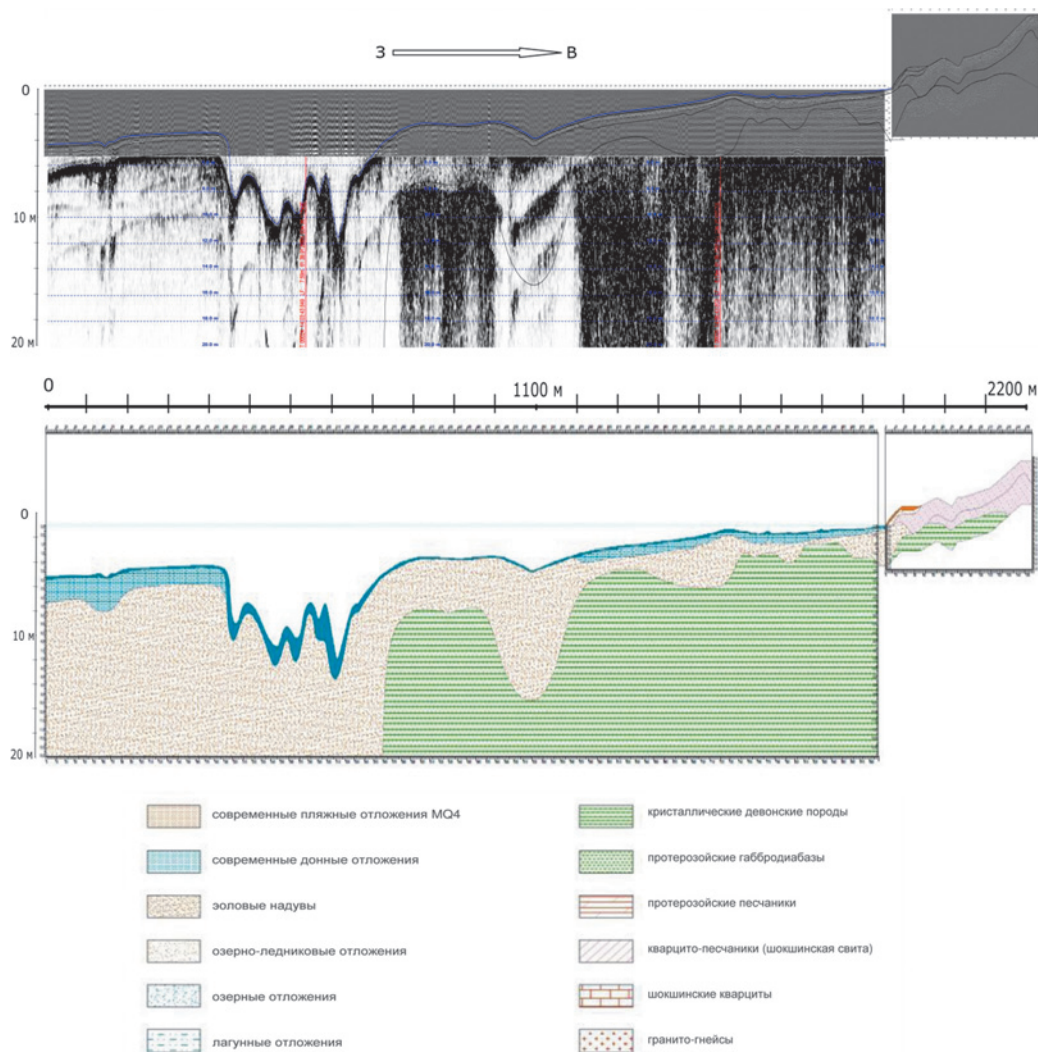


Рис. 5. Пример георадарного профиля, совмещенного с акустическим профилированием пляжа (фрагмент), и его интерпретация. Исполнители: Загоскин А. Л., Терский П. Н. Местоположение профиля: бухта Деревянская

поясов), что указывает на уязвимость пляжей в случае заметного подъема уровня озера или добычи строительного материала в береговой зоне. Разнообразие четвертичных отложений на суше обуславливает их особенности на смежном с урезом озера подводном береговом склоне и повышает разнообразие типов берегов в каждом из районов Онежского озера.

Примеры полученных профилей показаны на рисунках 4 и 5.

На побережье северной части Онежского озера на небольших, 2–4 метра, глубинах встречаются коренные дочетвертичные породы. В остальных районах они не встречались до глубины 5 метров или обнаружены лишь на части длины профиля, что вполне согласуется с фондовыми данными, указывающими на то, что в среднем мощность четвертичных

отложений составляет 10–20 метров и более. Именно различия в мощности четвертичных отложений, которые в целом в большей степени подвержены абразии или размыву, во многом обуславливают преобладание слабоизмененных берегов в северной части Онежского озера и их незначительную долю в остальных районах. Дочетвертичные породы представлены различными гранитами и диоритами, габбро, габбродиоритами, диорит-порфиридами и др., с минералогической точки зрения они достаточно разнообразны и чаще всего устойчивы к абразии.

Морфология и типы побережий и берегов

Проведенные исследования в совокупности с анализом фондовых материалов

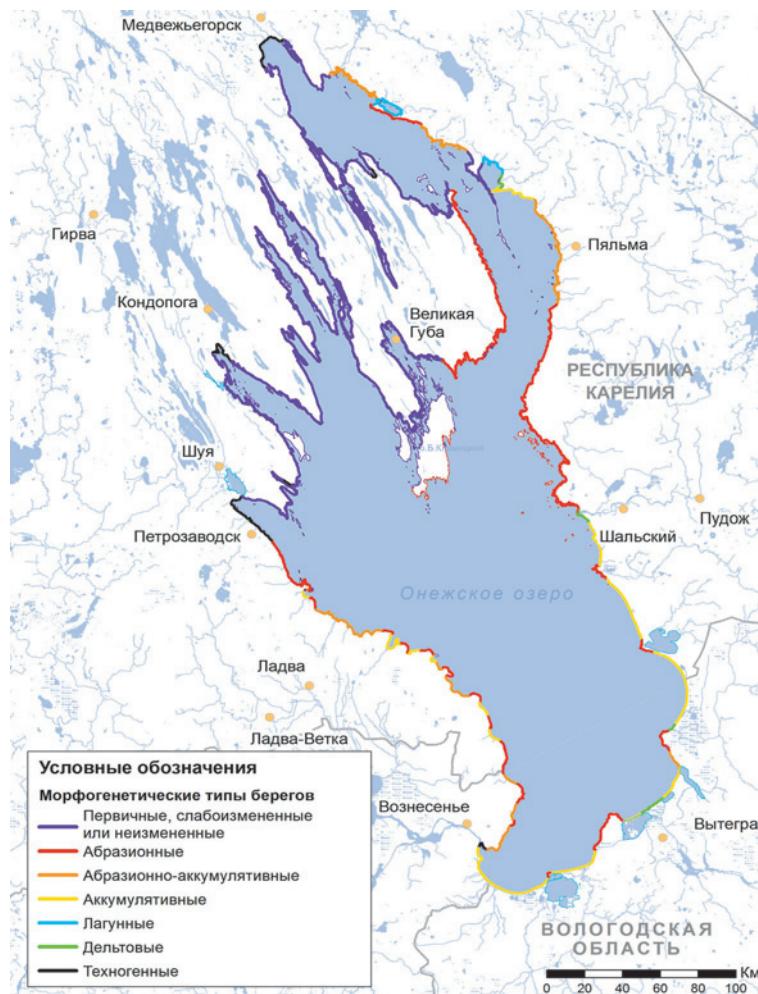


Рис. 6. Карта морфогенетических типов берегов Онежского озера

и литературных сведений позволяют выполнить морфогенетическую типизацию и районирование побережья и берегов Онежского озера. Выделенные районы существенным образом отличаются друг от друга по морфологии и генетическим особенностям рельефа и типам берегов, их динамике, геологическому строению и мощности чехла рыхлых отложений, изменчивости ландшафтов, условиям хозяйственного освоения и природопользования. Существенные отличия по происхождению и свойствам характерны и для рельефа дна прибрежной акватории (что выявляется при анализе построенных профилей и данных полевых исследований).

По данным Г. С. Бискэ с коллегами [1971], в истории развития современного рельефа территории особое значение приобретает послеледниковый этап. В этот период происходит завершение унаследованного формирования современного рельефа. Важную роль в его преобразовании сыграл тренд изостазийного

тектонического поднятия, начавшегося после отступления ледника и продолжающегося в настоящее время. Это привело к образованию многочисленных дизъюнктивных деформаций и дифференцированному преобразованию морфоструктурного плана территории.

На основании изучения геологического строения, четвертичных отложений, рельефа территории и современной динамики берегов осуществлена морфогенетическая типизация и составлена карта типов берегов Онежского озера (рис. 6).

Для различных физико-географических районов Прионежья составлена характеристика типов побережий.

Для южного побережья от истока реки Свирь до устья реки Вытегра характерны низменные заболоченные равнины, преимущественно озерные аккумулятивные. Местами встречаются участки с абразионно-аккумулятивными берегами, для Свири характерны техногенные. Из всех районов здесь в наибольшей

степени распространены лагунные берега. Району свойственна низменная прилегающая территория суши, относительно хорошая разработанность речных долин, повсеместный достаточно мощный чехол рыхлых четвертичных отложений, преимущественно ледниковых и озерно-ледниковых. Наличие Онежского обводного канала оказывает заметное влияние на рисунок речной сети, «отсекая» речные бассейны от озера. В восточной части района находится крупное Мегрское озеро, отделенное от Онежского озера косой.

Восточное побережье, включая Водлинскую низменность, характеризует озерно-аллювиальный тип. Распространен к северу от устья Вытегры и Андомской возвышенности до Беломорско-Балтийского канала и Повенецкого залива. В прибрежной зоне много разной величины лагунных озер ледникового происхождения. Болота региона в большинстве случаев являются заросшими озерами. Имеются широкие пляжи с развитыми золовыми формами рельефа, в частности дюнами.

Преобладают аккумулятивные берега, в том числе дельтовые (реки Черная, Андома и др.). В северной части района многочисленны острова, для которых характерны слабоизмененные берега. Развиты также абразионные, например, берега Андомской горы размываются со скоростью 1,5–2 метра в год.

Структурно-тектонический денудационный тип побережья расположен в западной части Онежского озера между рекой Свирь на юге и Петрозаводской губой на севере. Для него характерна высокая степень обнаженности коренных пород с наличием многочисленных структурно-тектонических образований, подверженных интенсивной денудационной препарировке и выветриванию. Берега в основном сложены коренными породами и крупнообломочным материалом из продуктов их выветривания и разрушения.

Фиардово-шхерный тип Онежского побережья занимает северную часть прибрежной зоны озера, включая заливы Большое Онего и Заонежский. Для него характерны формы рельефа, образованные в результате действия ледниковой и экзарационно-тектонической препарировки геологических структур в местах, ослабленных дизъюнктивными дроблениями. Разломная тектоника, ориентированная в субмеридиональном направлении с северо-запада на юго-восток, предопределила и положение ледниковых языков выпавивания. В результате экзарационно-тектонические лотки образовали густую сеть параллельно расположенных фиардов – относительно узких заливов, глубоко

вдающихся в сушу северной части Онежского побережья. Разнообразие формирующих берега коренных пород на данной территории, их разные физико-механические свойства и наличие гранитоидных куполов способствовали проявлению избирательной экзарации и образованию многочисленных экзарационно-тектонических останцов в виде больших и малых островов из «бараньих лбов», «курчавых» скал, луд или звонцев. В этих районах фиарды осложнены шхерами из густой сети таких островов.

Для прибрежной зоны Онежского озера были выделены следующие районы.

Район 1. Южное побережье, от устья Свири до устья Вытегры. Преобладают аккумулятивные и лагунные берега, встречаются абразионно-аккумулятивные. В целом берега этого района в наибольшей степени, в сравнении с берегами всех остальных районов, изменены волновыми процессами, первичные и абразионные берега здесь практически отсутствуют.

Район 2. Восточное побережье от устья Вытегры до устья Водлы. Преобладают абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные берега, встречаются дельтовые, например в районе устья Водлы, а также лагунные берега. Андомский мыс и смежные с ним участки берега – абразионные. Впадающие в озеро крупные реки Водла, Андома, Черная и другие вносят существенный вклад в баланс наносов.

Район 3. Западное побережье от Петрозаводска до устья Свири. Берега как абразионные, так и аккумулятивные. Преобладают абразионные и абразионно-аккумулятивные. В северной части района имеются также дельтовые берега.

Район 4. Кондопожская губа, Петрозаводская губа и берег между ними. В этом районе преобладают абразионно-аккумулятивные, а также мало измененные озером берега. Береговая линия изрезана, типичны «бараньи лбы». В кутовых частях губ имеются техногенные берега, особенно они характерны для Петрозаводска и ближайших окрестностей. У многочисленных островов внутри губ и между выходами из них берега также слабоизмененные. В Кондопожской губе встречаются дельтовые берега. В пределах района, протяженность которого сравнительно невелика, протекают две из пяти крупнейших рек, впадающих в Онежское озеро, – Шуя и Суна. На северном побережье Петрозаводской губы и южном Кондопожской часто встречаются выходы дочетвертичных пород.

В Кондопожской губе расположено большое количество островов и подводных банок, навигация осложнена лудами. Губа характеризуется

значительным внутренним разнообразием рельефа: северное побережье занято ледниково-денудационным крупногрядовым, на южном берегу многочисленны выходы нижнепротерозойских коренных пород, имеются также участки грядового рельефа и равнины озерного, флювиального и биогенного происхождения. На Кондопожском полуострове встречаются камы.

Для этого района характерна интенсивная хозяйственная деятельность в связи с прохождением здесь железной дороги, а также осуществлением добычи полезных ископаемых.

Район 5. Северо-Западное Прионежье, залив Большое Онего. В данном районе наиболее сложный и разнообразный рельеф, десятки крупных островов (Большой Туль, Мижостров, Илем и т. д.) и множество мелких. Как для островов, так и для остальной территории характерно преобладание слабоизмененных или неизмененных берегов, что связано с многочисленными выходами кристаллических пород и относительно слабым волнением.

Выходы коренных пород, местами представляющие собой острова или участки берегов, слабо измененных озером, встречаются повсеместно. Многие острова являются полузатопленными озами. Типичны «бараньи лбы» со следами хорошо выраженной ледниково-экскавационной обработки.

Район 6. Заонежский полуостров, от острова Большой Климецкий до северной окраины Заонежского залива. Берега сильно изрезаны, но в меньшей степени, чем в заливе Большое Онего. Для большей части полуострова характерны слабоизмененные или неизмененные берега, на восточном побережье преобладают абразионные. Характерны глубоко вдающиеся в сушу заливы, образовавшиеся в результате разрывных нарушений под влиянием оглаживающего действия ледника (к примеру, губы Святуха и Уницкая). В заливах волнение сильно ослаблено. Типичны «бараньи лбы» с хорошо выраженной ледниковой шлифовкой и штриховкой.

Район 7. Повенецкий залив. Берега залива изрезанные. В морфогенетическом отношении они, несмотря на сравнительно малую площадь залива, очень разнообразны. Значительная их часть первичные, часто встречаются абразионные берега. Между Медвежьегорском и Повенцом преобладают аккумулятивные. Непосредственно в окрестностях этих городов, а также на участке Беломорско-Балтийского канала имеются техногенные берега.

Таким образом, берега Онежского озера подразделяются на семь морфогенетических типов: первичные, слабоизмененные или

неизмененные; абразионные; абразионно-аккумулятивные; аккумулятивные; лагунные; дельтовые; техногенные.

Первичные берега характерны главным образом для Заонежья, то есть для участков береговой линии с отсутствием волнения или очень слабыми волнами, обусловлены чаще всего выходами кристаллических пород. Абразионные распространены повсеместно, за исключением южной части озера, характерны для всех побережий, кроме низменных и прилегающих к речным дельтам. Аккумулятивные преобладают на южном и восточном побережье, встречаются на западном, чаще всего характерны для низких, слабонаклоненных участков примыкающей суши, либо для тех, которые сложены легко размываемыми породами. Абразионно-аккумулятивные представляют собой промежуточный тип между двумя вышеназванными и распространены повсеместно, кроме Заонежского полуострова и залива Большое Онего, где встречаются очень редко. В ряде случаев они представляют собой абразионно-аккумулятивные дуги с мысами, блокированными наваленными около уреза валунами.

Разнообразие типов берегов Онежского озера во многом определяется неодинаковой устойчивостью их к абразионной деятельности волн. Отмечено, что «формирование берегов наиболее интенсивно происходит в начальный период возникновения водоема и по мере образования береговой отмели, гасящей энергию волн, затухает, усиливаясь лишь в многоводные годы. На озерах – с их многовековой историей – в современный период этот источник осадкообразующего материала не имеет существенного значения» [Субетто, Прыткова, 2016]. Однако значительная часть берегов Онежского озера относятся к слабоизмененным, где берег блокирован выходами коренных кристаллических пород или защитную роль выполняет валунно-галечная отмостка, сформировавшаяся на подводном склоне.

Заметное влияние на динамику берегов оказало строительство Свирской ГЭС в 1953 году, повлекшее за собой подъем уровня вод озера примерно на полметра. Это не могло не отразиться и на соотношении берегов различных типов. Берега реагируют на такие изменения по-разному, но есть тенденция к увеличению доли абразионных берегов и переходу абразионно-аккумулятивных в абразионные. Повышение уровня Онежского озера примерно на полметра привело к схожим последствиям. На абразионных и абразионно-аккумулятивных берегах усилились процессы абразии или размыва. Пляжи, которые сформировались на

Типы берегов Онежского озера, характерные динамические процессы, географическое распространение и рекомендации по хозяйственному использованию

Тип берега	Географическое распространение и характерные динамические процессы	Рекомендации по хозяйственному использованию
Первичные слабоизмененные	Очень слабый абразионный процесс. Распространены в северной части озера в пределах фиардово-шхерного типа побережья.	Динамика берегов в данном случае не несет угрозу инженерным сооружениям, соответственно, их можно строить и эксплуатировать без учета береговой динамики.
Абразионные	Абразия или размыв берегов разной степени активности встречается повсеместно.	Мониторинг для тех участков, где в непосредственной близости от уреза имеются инженерные сооружения: расчет скоростей отступления, при необходимости – берегоукрепительные работы.
Абразионно-аккумулятивные	Образование бухтовых абразионно-аккумулятивных систем, формирование фрагментарных пляжей – не шире 10–15 метров. Чаще всего встречаются на западном побережье.	Мониторинг для тех участков, где в непосредственной близости от уреза имеются инженерные сооружения: расчет скоростей отступления берега и берегоукрепительные работы, в частности подсыпка пляжей.
Аккумулятивные	Аккумулятивные процессы, ведущие к формированию пляжей различной ширины; вдоль береговой линии перенос наносов с соседних участков, поступающих с реками и в ходе абразии и размыва. Чаще всего встречаются на восточном побережье, развиты и на южном.	На подобных участках может иметь место обмеление, и это нужно учитывать при судоходстве; пляжи являются естественной защитой берега от размыва, в случае наличия около уреза инженерных сооружений не рекомендуется изъятие грунта.
Лагунные	Так как лагуны отделены от открытого озера пересыпями, то таким берегам динамические процессы практически не свойственны. Распространены на южных и восточных берегах.	Берега являются стабильными, что позволяет не считаться с близостью уреза в ходе хозяйственной деятельности.
Техногенные	В целом динамические процессы находятся в руках человека; имеет место воздействие озера на берегоукрепительные сооружения, в некоторых случаях – аккумулятивные процессы. На смежных с укрепленными участками берегах может активизироваться низовой размыв.	Необходим мониторинг за состоянием берегоукрепительных сооружений и за смежными участками берега, особенно при наличии там инженерных объектов.
Дельтовые	Как для берега, так и для подводного берегового склона характерны потоки наносов различной интенсивности; такие участки являются источниками их поступления. Характерны аккумулятивные процессы приустьевой зоны впадающих рек. Распространены в устьях крупных рек.	Данный тип берегов отличается особой динамичностью, что необходимо учитывать в хозяйственной деятельности. На смежной с такими участками акватории может иметь место обмеление, которое нужно учитывать при судоходстве.

аккумулятивных и абразионно-аккумулятивных берегах, во многих случаях частично или даже полностью были уничтожены, что способствовало переходу части аккумулятивных берегов в тип абразионно-аккумулятивных, а последних, в свою очередь, в абразионные.

Реакцию берегов на изменение уровня озера определяют уклоны подводного берегового склона и прилегающей суши, волновой режим, величина подъема уровня вод озера, а также горные породы, которыми сложен береговой уступ.

Скорость отступления берегов в ходе абразионных процессов может достигать нескольких десятков сантиметров в год и более, это определяется параметрами волн (высотой, направлением и т. д.), составом берегоформирующих пород, морфологией подводного берегового склона, наличием или отсутствием пляжа, высотой клифа.

Типы берегов Онежского озера с характерными для них динамическими процессами, их географическое распространение и рекомендации по хозяйственному использованию приводятся в таблице.

Наибольшей динамичностью обладают абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные и дельтовые берега. При этом на разных участках берега она неодинакова. Там, где имеет место активная абразия, например, в районе Андомской горы, где берега отступают со скоростью 1,5–2 метра в год, в случае наличия инженерных сооружений вблизи уреза воды озера необходимы берегоукрепительные работы. Чтобы остановить процесс разрушения берегов и уничтожения этого памятника природы и населенных пунктов, расположенных на вершине Андомской горы, необходимо сооружать вдоль берегов каменные набросы или подводные фильтрационные волноломы. Для принятия

решения об осуществлении берегоукрепительных работ и выборе способа берегоукрепления нужны дополнительные исследования.

В защите, по всей видимости, нуждаются участки берегов, использование которых является приоритетным в рекреационных целях и которые в то же время подвержены активным абразионным процессам. Может возникнуть необходимость в берегоукрепительных работах для тех абразионно-аккумулятивных и особенно абразионных участков берегов, на которых расположены сооружения и дороги. Наибольшие опасения вызывают населенные пункты, дороги и объекты промышленного природопользования (как, например, поселок Выгойнаволок на южной окраине Петрозаводска), расположенные в непосредственной близости к урезу воды озера. На крупномасштабных картах видно, что достаточно близко к берегу расположены поселки Каскесручей, Кварцитный в бухте Шокша, Деревянное в Уйской губе, Ежины, Кюршево, Климовское. Но в них чаще всего объекты транспортной и селитебной инфраструктуры расположены на некотором расстоянии от берега – в нескольких десятках метров и дальше, что делает маловероятным в ближайшее время повреждение и разрушение их вследствие волнового воздействия со стороны озера.

К объектам транспортного природопользования, кроме автомобильных дорог, которые нечасто проходят вблизи уреза озера, относятся порты и причалы. Если всем остальным вышеперечисленным сооружениям угрозу несет лишь абразия и (или) размыв берегов, то для портов и причалов дополнительной проблемой является заносимость.

Выводы

Берега Онежского озера разнообразны, их происхождение, морфология и динамика тесно связаны с морфогенетическими особенностями становления рельефа побережий и их типами. Унаследованный режим развития доголоценового рельефа побережий отразился на современном этапе формирования берегов Онежского озера.

Наиболее консервативные условия функционирования берегов свойственны для фьордово-шхерных и структурно-тектонических типов побережий. В пределах этих районов берега обладают наибольшей устойчивостью и не подвержены существенным изменениям.

Из выделенных семи типов берегов наиболее активные динамические процессы свойственны абразионно-аккумулятивным и особенно абразионным. Для последних отмечены

различные скорости абразии, от первых сантиметров до 1–1,5 метра в год, в зависимости от силы волнового воздействия, высоты берегового уступа, морфометрических параметров подводного берегового склона и наличия или отсутствия пляжа. При хозяйственном использовании таких берегов необходимо учитывать набор динамических процессов и их активность, характерные для каждого типа берега.

Подъем уровня озера вследствие строительства Свирской ГЭС привел к возрастанию процента абразионных берегов, равно как и к активизации процессов абразии или размыва, на них протекающих.

Из всех типов берегов Онежского озера в укреплении нуждаются, главным образом, абразионные и абразионно-аккумулятивные, значительная часть которых слабо освоены человеком, особенно на восточном побережье. В пределах городов многие участки берегов превращены в техногенные, однако берегоукрепление в некоторых случаях необходимо. На участках с активной абразией в нем есть потребность при наличии любых инженерных сооружений в непосредственной близости от уреза воды. Аккумулятивные процессы, происходящие в береговой зоне, также должны учитываться при хозяйственном освоении, так как они могут создавать серьезные трудности для навигации и функционирования портовых сооружений.

Литература

Бискэ Г. С., Лукашов А. Д., Лак Г. Ц., Горюнова Н. Н., Ильин В. А. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1971. 74 с.

Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. Москва: Изд. АН СССР, 1962. 711 с.

Исследование современного состояния и качества вод Онежского озера: Отчет о НИР (заключительный) по ГК № 31/14 от 16.09.2014 / ФГБУ «ГОИН». Руководитель И. В. Землянов. М., 2015. 622 с.

История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Отв. ред. Д. Д. Квасов (Академия наук СССР, Ин-т озероведения). Ленинград: Наука, 1990. 280 с.

Макарьев А. А., Погорельский А. И., Макарьева Е. М. и др. Геологическая съемка масштаба 1:500 000 для Онежского озера (Geological survey of scale 1:500 000 for Lake Onega). М.: ФГУП ПМГРЭ, 2002. 396 с.

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

Старовойтов А. В., Токарев М. Ю., Марченко А. Л., Субетто Д. А., Рыбалко А. Е., Алешин М. И. Возможности георадиолокации при изучении чет-

вертикальных отложений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 62–75. doi: 10.17076/lim268

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

Субетто Д. А., Прыткова М. Я. Донные отложения разнотипных водоемов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 90 с.

Филимонова Л. В., Лаврова Н. Б. Палеогеография Заонежского полуострова в позднем плейстоцене и голоцене // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 4. С. 30–47. doi: 10.17076/bg22

Поступила в редакцию 17.10.2016

References

Biske G. S., Lukashov A. D., Lak G. Ts., Goryunova N. N., Il'in V. A. Stroenie i istorija kotloviny Onezhskogo ozera [The structure and history of the Lake Onega depression]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1971. 74 p.

Filimonova L. V., Lavrova N. B. Paleogeografija Zaonezhskogo poluostrova v pozdnem plejstocene i golocene [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

Issledovanie sovremennoho sostojanija i kachestva vod Onezhskogo ozera: Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj) po GK № 31/14 ot 16.09.2014 / FGBU "GOIN" [Research on the current state and quality of Onega Lake water: research report (final) in accordance with the GC № 31/14 dated 16.09.2014 / FSBI "SOI"]. Rukovoditel' I. V. Zemljanov [Head I. V. Zemlyanov]. Moscow: Izd. AN SSSR, 2015. 622 p.

Istorija Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Bajkala i Hanki [The history of Lakes Ladoga, Onega, Pskovskoye-Chudskoe, Baikal and Khanka]. Ed. D. D. Kvasov (Acad. of Science of the USSR, Institute of Limnology). Leningrad: Nauka, 1990. 280 p.

Makar'ev A. A., Pogorel'skii A. I., Makar'eva E. M. *i dr.* Geologicheskaja s'emka masshtaba 1:500000 dlja

Onezhskogo ozera [Geological survey of Lake Onega. Scale 1:500000]. Moscow: FGUP PMGRE, 2002. 396 p.

Semenovich N. I. Donnye otlozhenija Onezhskogo ozera [Bottom sediments of Lake Onega]. Leningrad: Nauka, 1973. 104 p.

Starovoitov A. V., Tokarev M. Yu., Marchenko A. L., Subetto D. A., Rybalko A. E., Aleshin M. I. Vozmozhnosti georadiolokacii pri izuchenii chetvertichnyh otlozhenij [GPR potential for studying the Quaternary sediments]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2016. No. 5. P. 62–75. doi: 10.17076/lim268

Subetto D. A. Donnye otlozhenija ozer: paleolimnologicheskie rekonstrukcii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstruction]. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 343 p.

Subetto D. A., Pрыtkova M. Ja. Donnye otlozhenija raznotipnyh vodoemov [Bottom sediments of water bodies of different types]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2016. 90 p.

Zenkovich V. P. Osnovy uchenija o razvitii morskikh beregov [Foundations of sea coasts dynamics]. Moscow: Izd. AN SSSR, 1962. 711 p.

Received October 17, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Игнатов Евгений Иванович

заведующий лаб. геоморфологии морских берегов, д. г. н., проф.
МГУ им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: ign38@mail.ru

Борщенко Евгения Вадимовна

старший научный сотрудник, к. г. н.
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: ev.borshchenko@gmail.com

Загоскин Алексей Леонидович

инженер
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: zagoskin.alex@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Ignatov, Evgeny

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: ign38@mail.ru

Borshchenko, Evgenia

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: ev.borshchenko@gmail.com

Zagoskin, Aleksey

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: zagoskin.alex@gmail.com

Землянов Игорь Владимирович

заведующий лаб. автоматизированных систем, к. ф.-м. н.
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: ivz@geocentre.ru

Санин Александр Юрьевич

младший научный сотрудник, к. г. н.
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: eather86@mail.ru

Терский Павел Николаевич

научный сотрудник, к. г. н.
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: pavel_tersky@mail.ru

Фатхи Михаил Олегович

младший научный сотрудник
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034
эл. почта: o.miel@mail.ru

Zemlyanov, Igor

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: ivz@geocentre.ru

Sanin, Aleksandr

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: eather86@mail.ru

Terskii, Pavel

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: pavel_tersky@mail.ru

Fatkhi, Mikhail

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia
e-mail: o.miel@mail.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.482.213+528.8.04

BIO-OPTICAL RETRIEVAL ALGORITHM FOR THE OPTICALLY SHALLOW WATERS OF LAKE MICHIGAN. I. MODEL DESCRIPTION AND SENSITIVITY/ROBUSTNESS ASSESSMENT

**A. A. Korosov¹, D. V. Pozdnyakov^{1,2}, R. Shuchman³,
M. Sayers³, R. Sawtell³, A. V. Moiseev²**

¹ Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Norway

² Scientific foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”, Russia

³ Michigan Tech Research Institute, USA

Lake Michigan (LM) is generally an oligotrophic clear water body, especially in its littoral zone where ecology-relevant processes unfold due to a variety of natural and anthropogenic forcings arising from the watershed. However, the bottom influence there is strong enough to contaminate the at-satellite signal, thus impeding the remote sensing of water quality parameters within the coastal zone. A new bio-optical retrieval algorithm, based on a forward radiation transfer model, LM specific hydro-optical model and the multivariate optimization technique are developed for operational retrieval from satellite data of water quality parameters in lake's optically shallow areas. As a result, the concentrations of major Color Producing Agents (CPAs), viz. phytoplankton chlorophyll, total suspended matter and yellow substance could be retrieved in transparent coastal waters with a variety of bottom cover types: sand, silt, stands of *Chara*, and *Cladophora*, and limestone pebble. The sensitivity of both forward and inverse models was tested for LM hydro-optical conditions. By means of forward simulations it is shown that at very low concentrations of CPAs (less than 0.01 in respective units) the optical influence of the bottom becomes indiscernible if the bottom depth, H approaches 20 m. In waters loaded with higher quantities of total suspended matter (TSM) and phytoplankton chlorophyll, CHL, the bottom influence ceases at H ~ 10 m. The noise sensitivity has shown that the shallower the water column and higher bottom albedo the more significant is the ensuing error in CPA retrievals. E. g. for a sandy bottom and water column of 5 m, a 10 % error in determining of albedo leads to a 18 %, 28 % and 10 % error in retrieving, respectively, CHL, TSM and colored dissolved organic matter, CDOM.

Key words: optical remote sensing; spectral reflectance; attenuation; surface albedo; optically shallow waters; limnology; Lake Michigan.

А. А. Коросов, Д. В. Поздняков, Р. Шухман, М. Сайерс, Р. Соутелл, А. В. Моисеев. БИООПТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИ МЕЛКИХ ВОД ОЗЕРА МИЧИГАН. I. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ ТОЧНОСТИ/НАДЕЖНОСТИ

Озеро Мичиган относится к олиготрофному типу водоемов. Сильнее всего это проявляется в прибрежной зоне, где гидрологический режим вод формируется под действием различных природных и антропогенных факторов, протекающих на водосборной территории. Влияние дна достаточно сильно искажает регистрируемый спутником сигнал, препятствуя выполнению дистанционного зондирования параметров качества воды в этой части озера. Для извлечения из спутниковых снимков параметров качества воды в оптически мелких районах озера Мичиган был разработан новый биооптический алгоритм. Он основан на модели переноса излучения, гидрооптической модели озера Мичиган и многомерной оптимизации и позволяет получать оценку концентрации всех основных оптически активных веществ (ОАВ) в областях с различным типом дна: песок, ил, макрофиты (*Chara* или *Cladophora*) и известняковая галька. Тестирование алгоритма показало, что при очень низких концентрациях ОАВ (менее 0,01 в соответствующих единицах измерения) оптическое влияние дна становится незначительным при глубине около 20 метров. В воде с более высокими концентрациями взвешенного вещества (ВВ) и хлорофилла влияние дна становится неразличимым при глубине ~10 м. Тестирование чувствительности алгоритма к шуму показало, что чем меньше толщина исследуемого водного столба и чем выше альbedo дна, тем выше погрешность восстановления концентраций ОАВ. Например, в случае песчаного дна и глубины 5 м погрешность в 10 % при оценке альbedo дна приводит к ошибкам в 18, 28 и 10 % при восстановлении хлорофилла, ВВ и окрашенного растворенного органического вещества соответственно.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; спектральное отражение; альbedo дна; оптически мелкие воды; лимнология; озеро Мичиган.

Introduction

In the case of Lake Michigan, remote sensing encounters a serious methodological problem. With the exception of some bays and specific areas within the coastal zone, this Great Lake is an oligotrophic water body with optically clear waters [Effler et al., 2013]. Due to high water clarity, the bottom influence exerted on the light coming out from beneath the water surface is strong enough to contaminate the at-satellite signal [Gordon, Brown, 1974]. This is bound to impede the remote sensing of bulk water quality parameters within the coastal zone. The above problem is encountered in satellite studies of other littoral areas in the other four Laurentian Great lakes as well as many aquatic environments throughout the world's oceans. A variety of methodological approaches have been exploited to meet this challenge as described below.

The inverse problem solution (IPS) in the case of optically shallow waters consists in untangling the light signals originating from water column backscattering and bottom reflection. It offers a very important potential to retrieve the state and dynamics of both bottom topography [Hu, 2008], and bottom cover type [e. g. Hu et al., 2003; Dekker et al., 2011]

due to river- and land-runoff [Hu et al., 2004, 2005], and climate change [Shuchman et al., 2006].

The distribution of seagrass and macrophytes across the bottom reflects the trophic state and quality of nearshore waters. At the same time, it is controlled by attenuation of sun light propagating through the water column due to water Color Producing Agents (CPAs) such as phytoplankton, dissolved organics, and tripton. In many applications, those two aspects of the IPS develop into either separate or combined tasks of remote sensing of optically shallow water bodies depending on the specific aims of surveillance.

The history of investigation of potentials of ocean color data to determine bottom depth and benthic cover types as well water constituents over large optically shallow areas exceeds several decades. Starting from predominantly empirical approaches [Lyzenga, 1978; Clark et al., 1987; Philpot, 1989], IPS methods have gradually developed into a specialized area of research.

In this study of Lake Michigan's peripheral zone, we develop a multiband **Bio-Optical RETrieval ALgorithm** for **Optically Shallow Waters** coined **BO-REALI-OSW**. The algorithm retrieves CPA concentrations from remote sensing reflectance in clear

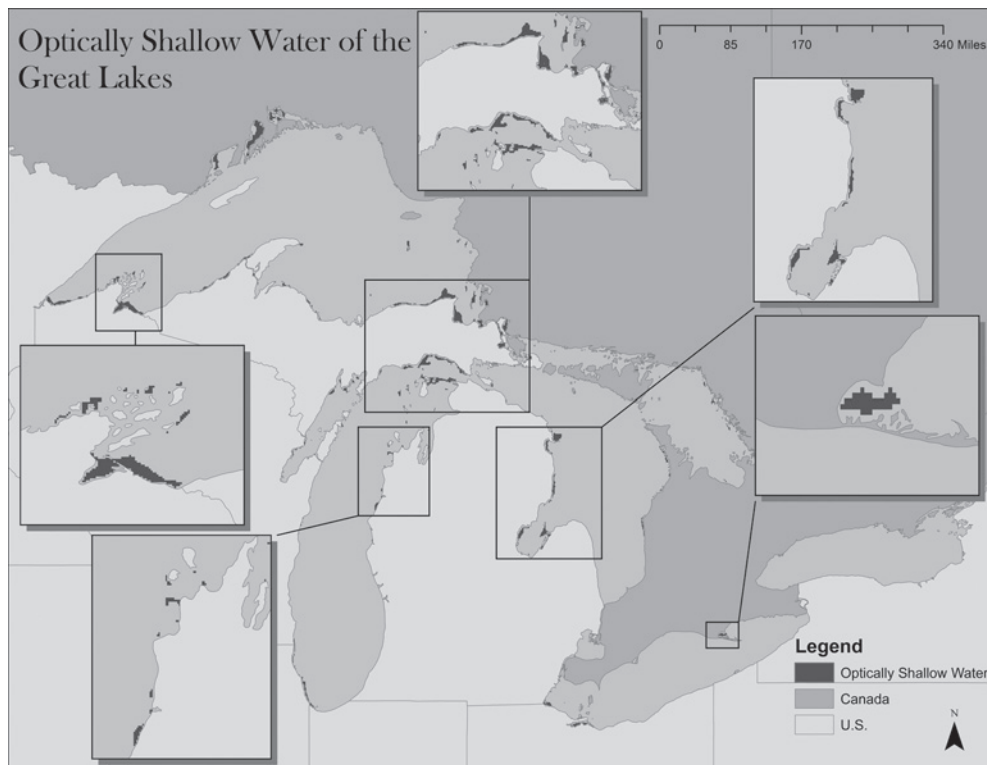


Fig. 1. Optically shallow water of the Great Laurentian Lakes

waters for a variety of bottom depths and bottom types. It is an extension of the BOREALI algorithm that has been previously developed for optically deep and turbid waters, went through thorough verification campaigns [Korosov et al., 2009] and proved its efficiency for a wide variety of water bodies including the North European and North American Great Lakes, among the latter – Lake Michigan [Shuchman et al., 2006].

Importantly, the BOREALI algorithm permits simultaneous retrieval of the concentrations of three ecologically important water quality constituents, viz. phytoplankton chlorophyll, suspended *minerals* and *dissolved organic matter*. The ability of the BOREALI algorithm to differentially provide quantitative information on these three water constituents makes its use particularly valuable for limnologists and water management agencies in their studies of ecological status and its dynamics driven by anthropogenic, invasive species and climatic forcing.

Due to the legacy of the BOREALI algorithm, the BORREALI-OSW algorithm also permits to simultaneously retrieve, in addition to phytoplankton chlorophyll content, the concentrations of suspended minerals and dissolved organic matter as opposed to those algorithms that retrieve just total suspended matter, or non organic suspended matter and absorption of colored dissolved organic matter [e. g. Dekker et al., 2011]. This distinction is very important for identification of the nature and inten-

sity of inputs of substances into the coastal zone with the river- and land- runoff in order to get a better insight into the mechanisms of the ecosystem forcing. It is also valuable for ecological simulations as the models do not operate with total suspended composition or absorption of yellow substance, but with specific water quality constituents.

The distinguishing features of the BOREALI and BOREALI-OSW algorithms are, first and foremost, that they (i) require a manageable number of input parameters, (ii) are extendable to any aquatic environment, for which a dedicated hydro-optical model is available, (iii) do not require any preliminary tuning and are ready for use. BOREALI-OSW can also yield spectral values of $K_d(\lambda)$ in the water column over the bottom because it retrieves the concentrations of water color producing agents and uses the respective specific absorption and backscattering coefficients (see below eqs. 7 and 8, section 4). Finally, they are truly near-operational. The BOREALI-OSW algorithm employs the Levenberg-Marquardt multivariate optimization procedure, and uses in this study the recently established hydro-optical model of Lake Michigan [Shuchman et al., 2013a].

The BOREALI-OSW algorithm has the potential to be a very useful tool in studying littoral ecosystems throughout the entire Laurentian Great lakes. Figure 1 is a map of optically shallow water (red areas) in the five lakes where the use of

BOREALI-OSW is applicable. The majority of the areas mapped are areas of high concern from a resource management perspective.

This paper addresses the methodology of the elaborated tool, the assessment of its sensitivity to the hydro-optical conditions and types of substrates inherent in the coastal zone of Lake Michigan, as well as the accuracy of retrieval of the desired parameters. To test its performance, the algorithm is applied to simulated, field-measured and MODIS data. We show that its accuracy is superior to the standard OC4 algorithm [O'Reilly et al., 2000]. It can also be applied to other present and future multispectral spaceborne sensors such as NPP/VIIRS and Sentinel 3/OLCI.

Lake Michigan: a concise general description

Lake Michigan (41°35'N – 46°N; 85°W – 88°W, Fig. 2), like the four other Laurentian Great Lakes of North America, began to form at the end of the last glacial period approximately 10,000 years

ago. Due to the nature of its formation (initially a pristine melt water body), morphometry (the average depth is 85 m, the water volume is 4,900 km³ second largest by volume), thermal regime (even in summer, the water temperature at the bottom does not exceed 5 °C) and the watershed soil geochemistry [Gillespie et al., 2008] the lake was originally oligotrophic [Chapra et al., 1981].

It still remains mostly as such due to its glacial heritage, although there are indications that the lake's trophic status should now be defined as oligo-mesotrophic [Mida et al., 2010]. This is because Lake Michigan has been subjected to external pressure produced by climate warming (water temperature growth in upper layers), atmospheric fallouts (phosphorus deposition) and human activities (input of phosphorus and other pollutants, including toxic ones, through sewages and atmospheric deposition) as well as introduction of invasive species.

The anthropogenic impact proves to be especially pronounced in the southern part of Lake Michigan: there are the most urbanized areas in the

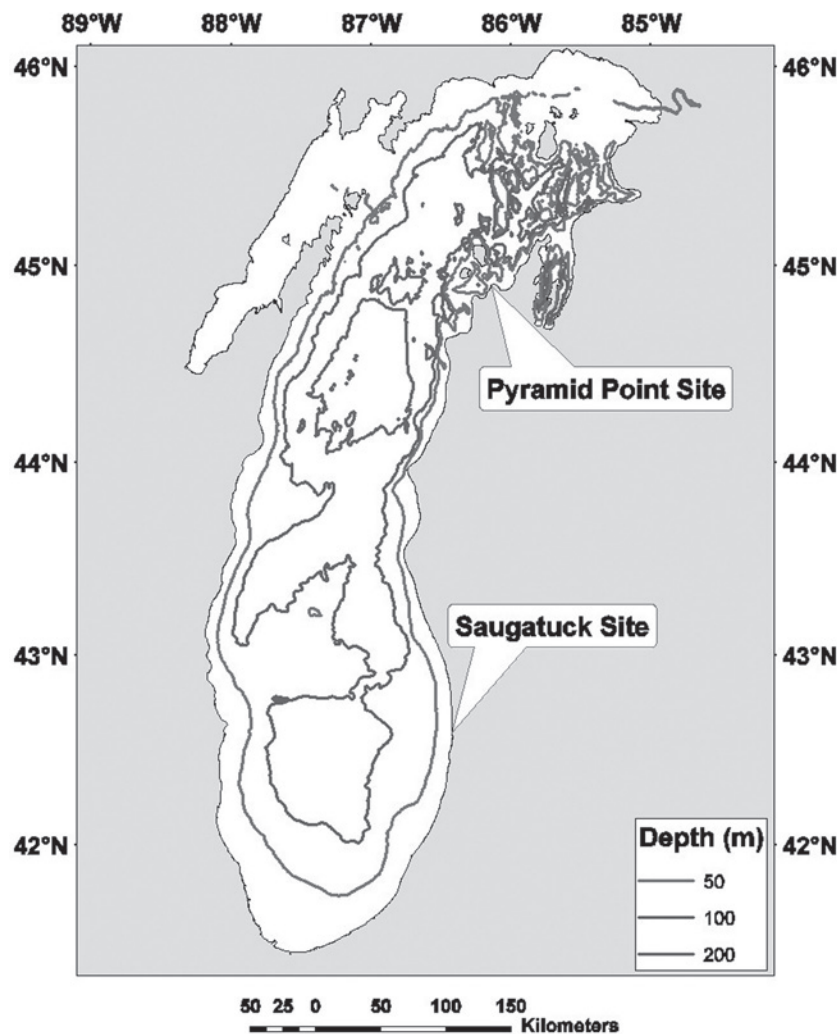


Fig. 2. Lake Michigan bathymetry

Table 1. Combinations of concentrations used in numerical experiments. Water type labels in the first column are referred to in the rest of the text

Water type label	C_{CHL} $mg\ m^{-3}$	C_{TSM} $g\ m^{-3}$	a_{CDOM} m^{-1}
Clear water	0	0	0
CHL-dominated clear water	1	0	0
TSM-dominated clear water	0	0.2	0
Slightly turbid water	1	0.2	0.05
Turbid water	2	0.5	0.1
Very turbid water	5	1	0.5

Great Lakes system, whereas the northern part is less developed, sparsely populated with the exception of Green Bay, which is the recipient of waters of the Menominee River flowing through the Fox River Valley and carrying the wastes from the world's largest concentration of pulp and paper mills.

Some 186 invasive species have come to the Great Lakes, and among them are the quagga and zebra mussels entering the lakes in ballast water. Apart from damaging the lake ecosystem via disrupting some intrinsic trophic interactions, the mussels, as water filterers, increase the water transparency (e. g. at the Sleeping Bear Dunes the bottom visibility depth has increased from ca 2.5 m in 1970 up to 20 m in 2010) and thus let more solar light reach the bottom in shallow coastal zones [Nalera, Schloesser, 2014].

Phosphorous availability and mussels driven increased water clarity have resulted in the invigoration of benthic flora and macrophytes/submerged aquatic vegetation (SAV) as well as its proliferation to greater depths. (In Lake Michigan, *Cladophora* is the dominant SAV [Greb et al., 2004]).

Reportedly, the offshore extent of SAV generally does not exceed 5–10 m, although along the northernmost periphery of the lake the SAV standing stocks are found at depths nearing 20–25 m [Shuchman et al., 2013b].

Presently the phytoplankton community comprises four major groups: blue-green and green algae, diatoms and flagellates (<http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/foodweb/LMfoodweb.pdf>).

Methodology

Semi-empirical forward simulation

Hydro-optical model

The employed hydro-optical model is a set of the inherent optical properties (IOPs): spectral values of CPA specific (i. e., normalized to a respective CPA concentration) spectral coefficients of ab-

sorption, a^* and backscattering b_b^* of phytoplankton (CHL), and total suspended matter (TSM). The spectral influence of colored dissolved organic matter (CDOM) was confined in the model to its absorption measured in m^{-1} .

Due to the additive nature of IOPs, the bulk water inherent properties can be expressed as follows:

$$a(\lambda) = a_w + a_{CHL}^* C_{CHL} + a_{TSM}^* C_{TSM} + a_{CDOM}^* C_{CDOM} \quad (1)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw} + b_{bCHL}^* C_{CHL} + b_{bTSM}^* C_{TSM} \quad (2)$$

where w stands for water per se. In the present study, the hydro-optical model developed specifically for Lake Michigan was employed [Shuchman et al., 2013a].

Remote sensing reflectance

In our study we operate with the subsurface spectral remote sensing reflectance, R_{rs} , which is the upwelling spectral radiance just below the water-air interface, $L(-0)$ normalized to the downwelling spectral irradiance, $E(-0)$ at the same level [e. g. Jerome et al., 1996]. The algorithm for computing R_{rs} for optically shallow waters is based on the equation suggested by Maritorena et al. [1994] assuming that the coefficients of the upwelling and downwelling irradiance attenuation are equal and do not change with depth, H :

$$R(-0, H) = R_\infty + (A - R_\infty) \exp(-KH) \quad (3)$$

We can rewrite eq. 3 in the following form:

$$R(-0, H) = R_\infty [1 - \exp(-2KH)] + A \exp(-2KH) \quad (4)$$

The diffuse and remote sensing reflectance above surface (R_{rs}) are interrelated through the following relationship [Bukata et al., 1995]:

$$R_{rs}(\lambda, +0) = R(\lambda, -0) / Q \quad (5)$$

where Q is the ratio of the upwelling irradiance below the water surface to the upwelling nadir radiance below the water surface. Hence, eq. 4 can be converted into the equation for total remote sensing reflectance R_{rsTOT} by dividing both parts of the equation by Q :

$$R_{rsTOT}(\lambda, +0) = R_{rsDEEP} [1 - \exp(-2KH)] + A \exp(-2KH) / Q \quad (6)$$

where R_{rsDEEP} is the remote sensing reflectance of optically deep waters, K is the light attenuation coefficient, A is the bottom albedo and H is the depth. The value of K can be calculated using the Kirk [1984] parameterization:

$$K = (1 / \mu_1) [a^2 + ab(0.473\mu_1 - 0.218)]^{1/2} \quad (7)$$

where μ_1 is the cosine of the solar zenith angle after refraction at the air-water interface, a is the

total absorption (eq. 1) and b is the total scattering [Bukata et al., 1995]:

$$b = \frac{b_{bw}}{0.5} + b_{bCHL} + \frac{C_{CHL}}{0.011} + \frac{b_{bTSM}C_{TSM}}{0.08} \quad (8)$$

Remote sensing reflectance for deep waters is computed from the subsurface remote sensing reflectance (R_{rsSW}) using semi-analytical formula suggested by Lee et al. [2002]:

$$R_{rsDEEP}(\lambda, +0) = \frac{0.5R_{rsSW}}{R_{rsSW} - 1.7} \quad (9)$$

where R_{rsSW} is calculated using the parameterization suggested by Albert and Gege [2006] for a wide range of summer time sun elevation angles:

$$R_{rsSW}(\lambda, -0) = 0.512G \cdot (1 + 4.6659G - 7.8387G^2 + 5.4571G^3) \cdot (1 + 0.1098/\mu_1)(1 + 0.4021/\mu_2) \quad (10)$$

where $G = b_b / (b_b + a)$ and μ_2 is the cosine of the viewing nadir angle just below the surface. Ultimately, total subsurface remote sensing reflectance ($R_{rsSWTOT}$) is calculated from total remote sensing reflectance (R_{rsTOT}) using inversed eq. 9 [Lee et al., 2002]. The Q factor (eq. 6) value may vary in a wide range from π to 6 or even higher depending on water turbidity, sun zenith angle and viewing angle [Jerome, 1996; Mobley, 2002]. Based on the shipborne measurements conducted in Lake Michigan [EEGLE, 2003] we assume that for sun zenith angles below 30° (typical of summer-time illumination conditions within the Lake Michigan latitudinal belt) the Q factor does not vary significantly and on average is close to 4.

Inverse problem solution

The Levenberg-Marquardt algorithm

The problem of determination of the CPA concentration vector, C is solved using the multivariate optimization approach. The spectral difference between the measured (R_{rsWM}) and reconstructed remote sensing reflectance (using eq. 10) (R_{rsTOT}) is calculated as:

$$g(C) = R_{rsWM} - R_{rsTOT}(C) \quad (11)$$

The absolute minimum of g is found with the Levenberg-Marquardt finite difference algorithm [Press et al., 1992], which assures a rapid convergence of the iterative procedure. The following iterative expression is used to this goal:

$$C_{k+1} = C_k (F_k^T F_k + \mu_k D_k)^{-1} F_k^T g \quad (12)$$

where k is the iteration step, F is the Jacobian matrix, μ_k is the length and direction of minimization step, $D_k = \text{diag}(F_k^T F_k)$ is the diagonal of matrix of

$F_k^T F_k$. The Jacobian matrix has $n \times m$ elements and is calculated as follows:

$$f_{i,j} = \partial g(\lambda_i, C_j) / \partial C_j \quad (13)$$

where λ_i is the wavelength, at which R_{rsSW} has been determined (i. e., $i = 1-6$ in case of MODIS with 6 spectral channels in the visible region), C_j is the CPA concentration (encompassed by the concentration vector C). In our simulations $j = 1-3$, i. e. only three components were considered, viz. C_{CHL} , C_{TSM} and a_{CDOM} . Thus, through a multivariate iterative procedure testing sequentially the values of CPA specific concentrations, the magnitude of the concentration vector C , for which the Jacobian matrix is the minimum, eventually defines the solution of the inverse problem.

Realization of the algorithm in the code

The algorithm is realized as a Python and C++ software package called Bio-Optical REtrieval Algorithm for Shallow waters [BOREALI-OSW, <https://github.com/nansencenter/boreali>]. The Python part consists of one class called Boreali and incorporates the procedures for opening input files, loading the values of specific absorption and back-scattering coefficients from the text files and running the processing in several parallel threads. The C++ part consists of a hierarchy of classes called Hydrooptics and HydroopticsShallow and several interface functions that communicate with Python and CMINPACK library. The class Hydrooptics is designed for performing all hydro-optical calculations in deep waters and has separate procedures implementing eqs. 1, 2, and 10. The class HydroopticsAlbedo inherits from HydroopticsShallow and overrides methods implementing eqs. 6-9. The analytic formulas for calculating the elements of Jacobian matrices (presented in a general form in eq. 13) were excessively long and the discrete finite difference derivatives are used, which require less computations. The CMINPACK library was used for performing the Levenberg-Marquardt optimization procedure [More, 1984].

Numerical experiments with the forward model and BOREALI-OSW algorithm

Sensitivity analysis of the forward model

Several numerical experiments were conducted to test the applicability of the algorithm to processing of data from the Laurentian Great Lakes. In the first group of experiments, we tested the sensitivity of the forward model to variations in bottom depth and type as well as CPA concentrations. The spectral values of R_{rsTOT}

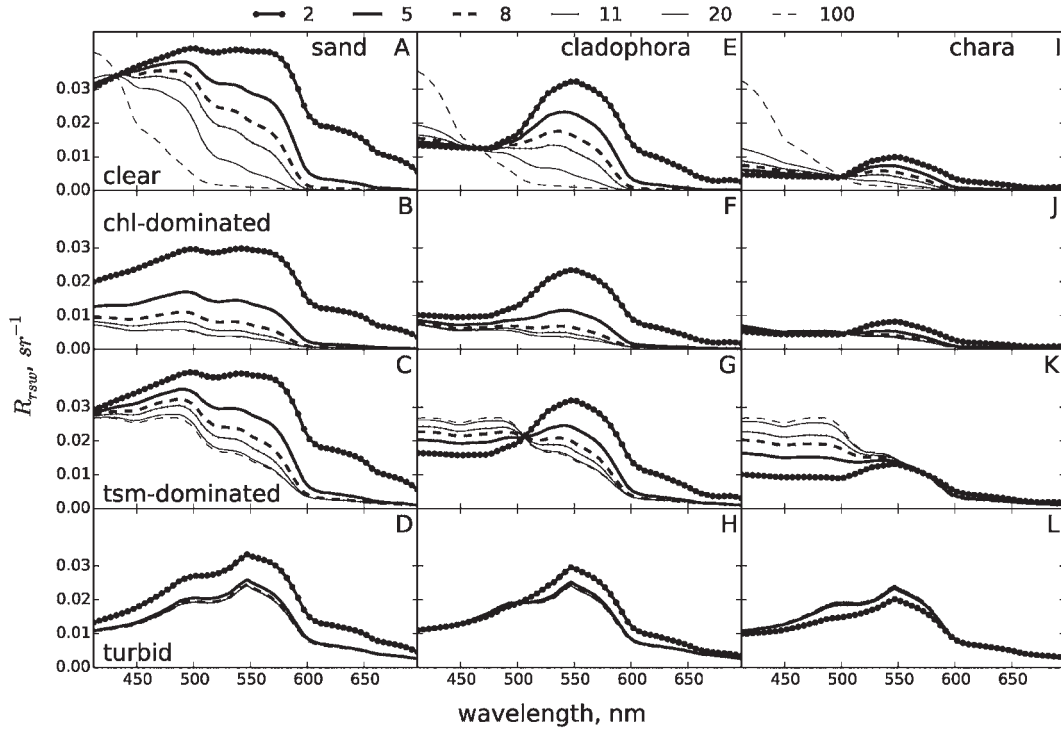


Fig. 3. Spectral values of R_{rswTOT} simulated for various combinations of 6 depths (denoted by the line style and thickness), 3 bottom types (in columns) and 4 combinations of CPA concentrations (in rows). The bottom type and the nicknamed water type are specified, respectively, in A, E, I and A – D boxes

were simulated for the following combinations of parameters typical of the Laurentian Great Lakes:

1. CPA concentration combinations are listed in Table 1;
2. Depths: 2, 5, 8, 11, 20, 100 m;
3. Bottom types: sand, silt, green algae *Chara sp.*, green algae *Cladophora glomerata*, and limestone pebble.

R_{rswTOT} spectra were plotted for each option specified above to reveal the responsiveness of R_{rswTOT} values to the variability in CPA concentrations and bottom depth and type. In addition, we studied the dependence of the spectrally averaged relative difference ($D_R = (R_{rswTOT} - R_{rswDEEP}) / R_{rswDEEP}$) on the same variables. The numerical simulations explicitly indicate (a few cases are exemplified in Fig. 3) that the bottom optical impact on R_{rswTOT} depends on a complicated interplay of all three factors: depth, bottom type and CPAs combinations. The strongest impact is observed in clear waters (the upper row of boxes in Fig. 3) but its intensity decreases as the concentration of one or several CPAs, i. e. CHL, TSM or CDOM, increases (the lower rows of boxes in Fig. 3).

In turbid waters, the impact is the lowest: only at a 2 m depth we can observe D_R of about 30 % whereas at more significant depths the bottom optical influence becomes undetectable. The sandy bottom (having the highest albedo averaged

throughout the visible spectrum) exhibits the highest impact on the water leaving signal (the left column of plots in Fig. 3): D_R reaches 3600 % for a 2 m depth in clear waters. The bottom covered with *Cladophora* produces a significantly lower impact: $D_{R,2m} = 1400$ % (the middle column in Fig. 3). Finally, a *Chara* – covered bottom (the third column in Fig. 3) and a silted bottom (not exemplified in Fig. 3) produce the lowest impact: $D_{R,2m} = 300$ %.

The bottom optical impact may result in either a general increase in R_{rswTOT} (see e. g. the case of a sandy bottom in CHL- and TSM-dominated waters, Fig. 3, boxes B, F, G), or a general decrease of R_{rswTOT} (see e. g. the case of a *Chara*-covered bottom in TSM-dominated waters, Fig. 3, box K), or a decrease in the blue accompanied by an increase in the red (see e. g. the case of a *Cladophora*-covered bottom in TSM-dominated waters, Fig. 5, boxes A, E, G) as the bottom depth declines. If the bottom albedo is high enough, higher values of R_{rswTOT} are observed in shallow waters as opposed to deep waters: more sun light is reflected due to both reflectance from bottom and backscattering within the water column. Contrarily, in shallow waters at low values of albedo, the bottom reflects less light than that backscattered by the water medium, and the resultant R_{rswTOT} (see eq. 10) becomes lower as compared to that in deep waters.

Table 2. Depths (m) at which the reflection from the bottom significantly impacts the water leaving light signal ($D_R > 10\%$)

Bottom Type	Clear Water	CHL-Dominated	TSM-Dominated	Slightly Turbid	Very Turbid
Sand	60	15	11	7	3
Silt	50	12	4	5	2
Limestone	50	12	4	5	2
<i>Cladophora</i>	35	12	4	5	2

The spectral signature of R_{rswTOT} is conjointly controlled by the spectral features of absorption and backscattering of water per se and co-existing CPAs as well as the spectral curvature of bottom albedo. Thus, in the case of clear waters and a sandy/highly reflective bottom (whose albedo grows linearly with the wavelength, Fig. 4) the hyperbola like spectrum of pure water reflection enhances rapidly in the blue with decreasing bottom depth, and at 2 m depth the R_{rswTOT} spectrum acquires a dome-like shape with a broad flat top stretching from 500 to 600 nm (Fig. 3, box A). Even though the sand albedo is highest in the red (Fig. 4), the growth of R_{rswTOT} with decreasing bottom depth in this spectral region is subdued due to strong water absorption at wavelengths > 620 nm. For the *Cladophora*-covered bottom, whose spectral albedo is dome-like (Fig. 4), at 2 m depth a well-pronounced peak centered at 550 nm stands out as a salient spectral feature in R_{rswTOT} accompanied by a decrease in the blue and red parts of the spectrum.

A comparison of R_{rswTOT} in the case of CHL- and TSM-dominated waters (Fig. 3, boxes B, C), reveals, firstly, that at bottom depths exceeding 2 m, it is nearly twice higher for CHL-dominated waters. Secondly, increasing bottom depth in CHL-dominated waters leads to a higher absorption in the blue due to chlorophyll with a result of a sig-

nificant reduction of R_{rswTOT} at $\lambda = 400$ nm (from 0.02 sr^{-1} at 2 m to 0.007 sr^{-1}) at 20 m, Fig. 3, box B.

Contrarily, in TSM-dominated waters, backscattering is the major player, and R_{rswTOT} at 400 nm remains almost intact with increasing bottom depth and retains a fairly high value (0.03 sr^{-1} Fig. 3, box C). In addition, due to backscattering by TSM the values of R_{rswTOT} are also enhanced in the red (ranging from 0.01 sr^{-1} at 2 m to 0.002 sr^{-1} at 5 m and deeper, Fig. 3, box C). This is in contrast with infinitesimal values of R_{rswTOT} for CHL-dominated waters when the bottom depth is in excess of 5 m (Fig. 3, box B).

At low bottom depths, R_{rswTOT} spectra in the case of CHL-dominated waters with a sandy bottom resemble rather closely R_{rswTOT} spectra originating from deep TSM-dominated waters: similar reflection enhancements at 490 and 550 nm, R_{rswTOT} values ranging from 0.03 to 0.005 sr^{-1} (Fig. 3, boxes B and C). It is the strong absorption of CHL-a and intense scattering by TSM which permit to unmistakably ascribe R_{rswTOT} spectra to waters categorized as CHL- and TSM dominated: spectra from shallow CHL-dominated waters should have lower values in the blue and red comparing to spectra from deep TSM-dominated waters.

The value of D_R decreases with the increase of either bottom depth or CPA concentrations, and this decrease depends on the bottom type. When D_R reaches some critical value, e. g. 10% , it is an indication that the uncertainty in measurements of R_{rswTOT} is higher than the method's sensitivity to the bottom optical influence. Table 2 illustrates our estimations of the depth, at which D_R is above 10% under different in-water conditions, i. e. combinations of CPA values and bottom types. At higher values of bottom depths, the correction for the bottom optical impact is not worth applying.

Our simulations indicate that in ideally clear waters even a *Chara*-covered bottom may be seen at depths of 11 meters, while sandy bottoms are discernible at depths of 60 meters. However, the presence in the water column of even low amounts of CHL or TSM reduces these depths to, respectively 4 and 15 meters. In turbid waters, the depth at which we can potentially detect the bottom optical impact is 3–7 meters and it is only 2 m or even less in very turbid waters.

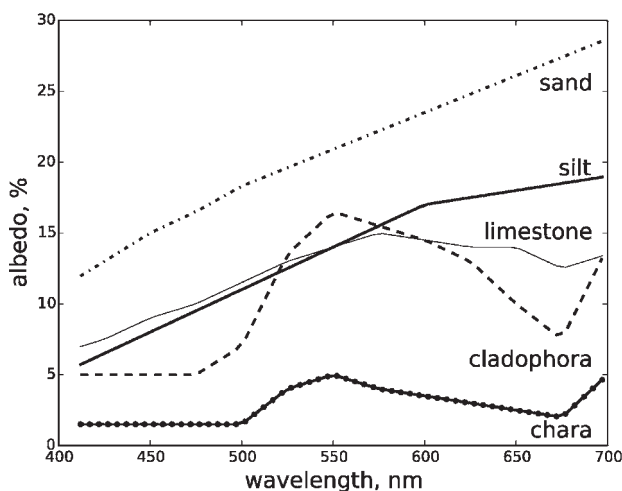


Fig. 4. Spectral values of bottom albedo used in our study (data from [Kutser et al., 2006])

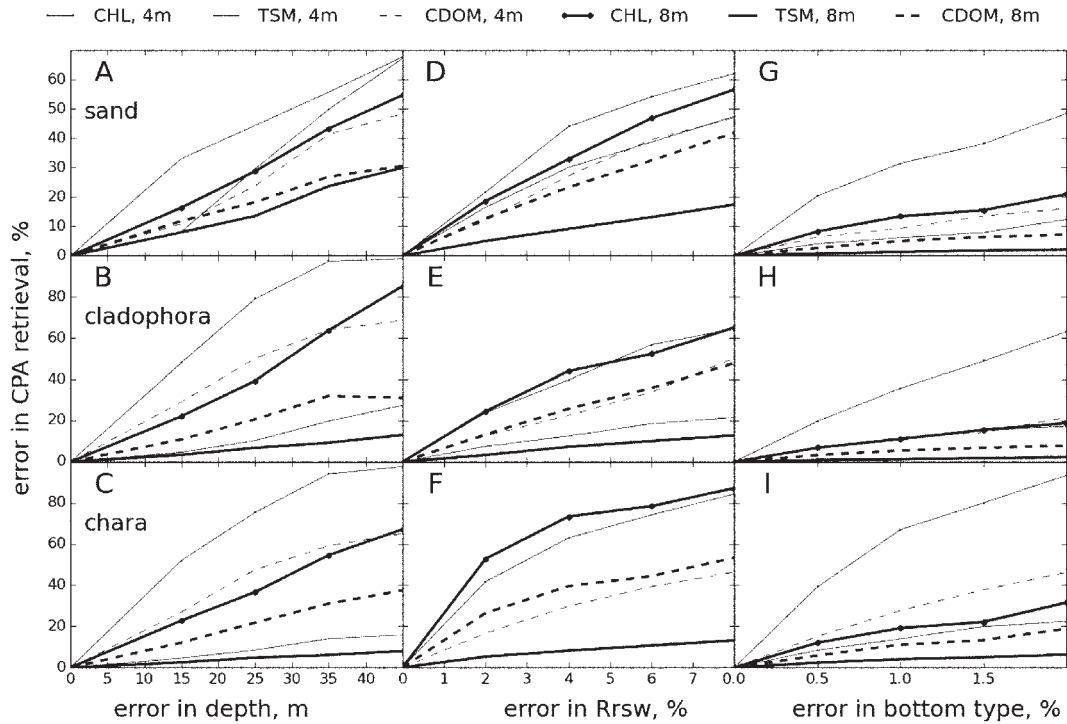


Fig. 5. Relative error of CPA concentration retrievals under various in-water conditions. Results of the numerical experiments are presented in three rows of boxes for each bottom type (sand, Chara-covered, Cladophora-covered) and three columns of boxes for each variable (depth, R_{rswTOT} , albedo). Each box contains plots for CHL (dotted line), TSM (solid line) and a_{CDOM} (dashed line) for two depths: 4 m (thin lines) and 8 m (thick lines). Results for a silt-covered bottom are not illustrated as they are very similar to those pertaining to the Chara-covered bottom

Thus summing up, the performed numerical simulations show that our model provides quite realistic values of R_{rswTOT} and accurately accounts for the various factors that affect its spectral shape. It is revealed that R_{rswTOT} spectra may be similar regardless of different water composition and bottom depth conditions (e. g. CHL-dominated shallowwaters or TSM-dominated deep waters). At the same time it is shown that there are features that make the reflectance spectra attributable to specific types of hydro-optical situations. Our analysis of D_R values permitted to identify conditions when the correction for bottom influence is mandatory.

Numerical experiments with the inverse problem solution.

Sensitivity of the retrieval algorithm to noise in input data

Sensitivity of the BOREAL-OSW algorithm is defined as a dependence of the error in retrievals of CPA concentrations on the errors in input values of either depth, H or reflectance, R_{rsw} or bottom type albedo, A . The sensitivity was estimated through numerical experiments involving the following three steps: (i) simulation of spectral R_{rswTOT} values using the afo-

respecified parameterizations suggested by Kirk [1984], Bukata et al. [1995], and Albert and Gege [2006] for K_d [Pozdnyakov, Grassl, 2003], b [Bukata et al., 1995] and R_{rsw} , respectively for a given set of CPA concentrations, water depths and bottom types; (ii) contamination of either H , R_{rswTOT} , or A with different levels of noise; (iii) retrieval of CPA concentrations and comparison with the ones used in the first step simulations. For each experiment 1000 vectors of CPA concentrations were randomly generated within the following concentration ranges: CHL: 0–5 mg/m³, TSM: 0–2 g/m³, a_{CDOM} : 0–0.5 m⁻¹.

The experiments were performed for three bottom types: sandy bottom, Chara-covered bottom and Cladophora-covered bottom, and for two depths: 4 and 8 m. Alterations of H were performed by adding a normally distributed noise with a standard deviation equal to 0, 0.5, 1, 1.5 and 2 m. Alterations of R_{rswTOT} were simulated by adding wavelength-independent normally distributed noise with a standard deviation equal to 0, 2, 4, 6 and 10 %. Alterations of spectral bottom albedo, A were enforced through spectral mixing of the correct A values with a 15, 25, 35 and 50 % departure. To compare simulated and retrieved CPA concentrations a normalized root mean square error (\tilde{E}) expressed in percent was employed:

$$\tilde{E} = 100 \sqrt{\frac{\sum_j (C_{ij}^S - C_{ij}^R)^2}{nC_{ij}^S}} \quad (14)$$

where C_{ij}^S is the simulated concentration of the i -th CPA in the j -th concentration vector, C_{ij}^R is the reconstructed CPA concentration, n is the number of vectors.

The results of our numerical experiments reveal (Fig. 5) that although the accuracy of CPA concentration retrieval exhibits a strong dependence on noise in input data, the algorithm remains reasonably robust.

Unlike deep waters, in shallow waters, the BOREALI-OSW algorithm is very sensitive to errors in the bottom depth, H (Fig. 5, boxes A, B, C). If the bottom has a high value of albedo (e. g. covered by sand), underestimation of depth even by 0.5 m results in misinterpretation of high spectral values of R_{rswTOT} , which are attributed to high values of TSM, thus increasing \tilde{E}_{TSM} to 30 %. In the case of a darker bottom (e. g. *Chara*-covered), errors in TSM retrievals do not exceed 15 % even in shallow waters and the data on depth noised up to 2 m (Fig. 5, boxes B, C). The results of retrieval of CHL and a_{CDOM} are more sensitive to noise in depth and \tilde{E} may exceed 20 % if the noise in depth is as low as 0.5 m.

The BOREALI-OSW algorithm proves to be very sensitive to errors in R_{rsw} with the worst results obtained for CHL (\tilde{E}_{CHL} exceed 20 % if only a 2 % noise is added to R_{rsw}). However, it performs with this noise much better for TSM (\tilde{E}_{TSM} does not exceed 20 % even if noise in R_{rsw} reaches 8 % at any depth or for any bottom type) (Fig. 5, boxes D, E, F). The algorithm is especially sensitive to noise in R_{rsw} for the *Chara*-covered bottom (Fig. 5, box F), i. e. when the bottom albedo is low.

In shallow waters, the error in bottom type mainly affects the accuracy of CHL retrieval: \tilde{E}_{CHL} rises above 20 % already at a 15 % error in bottom type (Fig. 5, boxes H, I, J). In deep waters the value of \tilde{E} for TSM and CDOM does not exceed 20 % even if the error in bottom type is as high as 50 %.

Table 3 summarizes the results of the BOREALI-OSW algorithm sensitivity experiments and specifies the conditions when the algorithm can be applied with acceptable accuracy (i. e., the average \tilde{E} for all three CPAs is below 30 %). The conditions listed in Table 3 are quite realistic

Table 3. Maximum levels of noise in H , R_{rswTOT} and A resulting in averaged values of $\tilde{E} < 30$ %. The first and second numbers stand for a 4 m and 8 m depth, respectively

Altered Variable	Sand	Cladophora	Chara
H	0.5 m, 1 m	0.5 m, 1.5 m	0.5 m, 3 m
R_{rswTOT}	3 %, 6 %	6 %, 10 %	2 %, 3 %
A	50 %, 80 %	50 %, 90 %	35 %, 95 %

and can be encountered in a variety of natural water bodies. This fully justifies the application of BOREALI-OSW in the Laurentian Great Lakes.

Discussion

In the following discussion we are focusing on two key aspects of the results intended to meet the original objectives set up in the present study: development of a bio-optical retrieval algorithm for very clear / optically shallow waters, and assessment of its potentials as an operative tool for satellite-based monitoring of the coastal zone of Lake Michigan.

Correspondingly, such an algorithm, named BOREALI-OSW, and the respective code were elaborated. The BOREALI-OSW algorithm is based on the Levenberg-Marquardt multivariate optimization technique, a hydro-optical model established specifically for Lake Michigan, and a few parameterizations relating (i) the bulk water column inherent optical properties (absorption and scattering) to the CPA concentration vector, C and (ii) the subsurface remote sensing reflectance to C , bottom type and depth as well as the sun illumination conditions.

Quite expectedly, the simulations revealed that the optical influence of the bottom reflection becomes progressively less pronounced with increasing C and absorption capacity of the substrate. However, possibly due to the CPA properties inherent in Lake Michigan, this dependency proves to be very steep: even in relatively clear water conditions (often found in many lacustrine aquatic environments: $C_{CHL} = 1$ mg/m³, $C_{TSM} = 0.2$ g/m³, $a_{CDOM} = 0.05$ m⁻¹), the most reflective (sandy) bottom does not impact appreciably the upwelling signal starting with $H = 7$ m, and it is optically inconsequential at $H = 3-5$ m, if the substrate is either *Cladophora* or *Chara*. In waters labeled by us as very turbid ($C_{CHL} = 5$ mg/m³, $C_{TSM} = 1.0$ g/m³, $a_{CDOM} = 0.5$ m⁻¹) (in reality, it is a rather conditional ascription because in many inland and shelf sea waters within the temporal latitudinal zone such waters should rather be subsumed under the category of relatively clear waters [Pozdnyakov, Grassl, 2003]), the water leaving signal is already immune to the optical impact of bottom, whose depth is about 2 m.

Our numerical simulations have shown that for the water type gradation adopted, TSM-dominated waters unlike CHL-dominated waters obscure the bottom far more radically: with the exception of a sandy bottom case, a bottom depth of 4 m is already a limit for affecting the CPA retrieval results.

It is worth mentioning that depending on the bottom depth and substrate type as well as the water composition, the spectra of total subsurface remote sensing reflectance, R_{rswTOT} might resemble

each other, e. g. in the case of CHL-dominated waters with a sandy bottom they resemble rather closely R_{rswTOT} spectra originating from deep TSM-dominated waters. Our simulations are explicitly indicative that this resemblance is entirely due to the specific features of CHL and TSM inherent optical properties.

Interestingly, irrespective of the spectral signature of the bottom substrate considered in our study, the spectral distribution in R_{rswTOT} exhibits invariably a prevalent bell-like maximum (at about 550 nm). This maximum decreases with water turbidity and bottom reflectivity. It is also noteworthy that the maximum is centered spectrally differently, but this difference is rather slight for all water composition options and bottom types. However, for low reflective/vegetated bottoms the water column becomes more reflective at shorter wavelength, especially in the TSM-dominated as opposed to CHL-dominated cases.

Based on numerical simulations, the developed coded model has been further submitted to a thorough analysis to reveal its sensitivity to the accuracy of such input parameters as bottom depth, H and bottom albedo/bottom type.

The retrievals of TSM with the BOREALI-OSW algorithm are vulnerable to errors in the bottom depth, H provided the substrate albedo is high. Contrarily, the retrievals of CHL and aCDOM suffer from errors in H estimations in the case of vegetated substrates: NRS MSE may exceed 20 % if the noise in depth is even below 0.5 m. Understandably, these effects arise completely from the spectral features of absorption and backscattering of respective CPAs: it is suffice to remind that CHL and CDOM are optically most active in the blue whereas TSM transforms the upwelling light predominantly at the wavelengths in excess of 550 nm.

The BOREALI-OSW performance efficiency is also susceptible to errors in R_{rswTOT} . This is particularly so for the retrievals of CHL and significantly less for restoring TSM. The former is accentuated in the case of vegetated substrates, and low bottom depths. As Table 5 illustrates, depending on the bottom type, the permissible errors in R_{rswTOT} ($\tilde{E} < 30\%$) must be within very narrow limits (2–6 %) at $H = 4$ m, which is a serious challenge given the typical inaccuracies in atmospheric correction inherent in level 2 data of MODIS [IOCCG, 2010]. The requirements to the accuracies in A , and, to certain degree, in H are less stringent and believed to be realistically attainable.

Assessing in general the performance of the developed code it can be defended that at least for bottom depths under ca 10 m the application of the BOREALI-OSW algorithm accounting for bottom optical influence yields CHL values apprecia-

bly closer to those determined in the laboratory as compared to CHL retrievals performed with the algorithms neglecting the bottom effect. At sites with a deeper bottom depth, the difference between the retrievals taking into account and neglecting the bottom optical impact progressively decreases, however it persists thus giving additional evidence in favor of the application of the BOREALI-OSW algorithm.

Conclusions

In attacking the problem of remote sensing of optically shallow waters with the purpose of retrieving concentrations of CPAs against the background of the light signal originating from bottom reflections, we pursued two avenues. Firstly, by means of forward simulations we analyzed through the spectral signature variations of subsurface remote sensing reflectance, R_{rsw} the modifications of the upwelling signal (controlled by the bottom type and depth). Then we passed to inverse problem simulations in order to test the sensitivity of our calculations of CPA concentrations to possible excursions of the input parameters such as bottom depth, bottom type, and measured spectral values of subsurface remote sensing reflectance, R_{rswTOT} . To do that, we developed a retrieval algorithm (BOREALI-OSW) dedicated specifically to cope with optically shallow waters.

To achieve the forward problem solution, we employed the hydro-optical model inherent in Lake Michigan water, and considered the bottom types encountered in this water body, viz. silicon sand, *Cladophora/Chara*, limestone rocks, and silt.

Our simulations have shown that even at very low CPA concentrations (less than 0.01 in respective units) the optical influence of the bottom becomes indiscernible, if the bottom depth, H approaches 20 m. In waters containing the total suspended matter (TSM) in quantities of about 0.5 g/m³ (while CHL and colored dissolved organic matter, CDOM remain infinitesimal) the bottom optical influence ceases at H slightly above 10 m. An analogous critical value of H was found if a_{CDOM} is 0.5 m⁻³, while CHL and TSM are infinitesimal.

The noise sensitivity analysis has shown that the shallower the water column and higher bottom albedo the more significant is the ensuing error in CPA retrievals. However, even in the case of a sandy bottom and a water column of 5 m, a 10 % error in determining its albedo leads to a 18 %, 28 % and 10 % error in retrieving, respectively, CHL, TSM and CDOM. In the case of deeper waters ($H = 10$ m) the noise in all considered CPA retrievals becomes lower than 4 %, 10 % and 4 % for CHL, TSM and CDOM, respectively.

Our analysis of the dependence of normalized root mean square error, $\bar{\epsilon}$ in CPA concentration determinations on the noise level in input values of bottom depth, H and bottom albedo, A has shown that $\bar{\epsilon}$ values can reach 18 %, ~30 % and 10 % for CHL, TSM and CDOM, respectively, if the noise in H is 10 %, but they become much higher (55 %, 55 % and 17 % for CHL, TSM and CDOM, respectively) if the noise in A is 10 %.

Our numerical assessment of the BOREALI-OSW algorithm performance in real conditions of Lake Michigan convincingly shows that at least for bottom depths less than 10 m its application to *in situ* radiometric data yields CHL values appreciably closer to those determined in the laboratory as compared to CHL retrievals performed with the algorithms neglecting the bottom effect. At sites with the deeper bottom depths, the difference between the retrievals taking into account and neglecting the bottom optical impact progressively decreases, however, remains appreciable thus giving additional evidence in favor of the application of the BOREALI-OSW algorithm.

This investigation was supported by NASA Roses Grant # NNX09AU88G and Michigan Tech Research Institute Internal Research and Development.

References

- Albert A., and Gege P. Inversion of radiance and remote sensing reflectance in shallow water between 400 and 800 nm for calculations of water and bottom properties. *Applied Optics*. 2006. Vol. 45, no. 10. P. 2331–2343.
- Bukata R., Jerome J., Kondratyev K., Pozdnyakov D. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton: CRC Press, 1995. 362 p.
- Chapra S. C., Dobson H. F. H. Quantification of the Lake Trophic Typologies of Naumann (Surface Quality) and Thienemann (Oxygen) with Special Reference to the Great Lakes. *International Association for Great Lakes Research*. 1981. Vol. 7, no. 2. P. 182–193.
- Clark R., Fay T., Walker C. Bathymetry calculations with Landsat 4 TM imagery under a generalized ratio assumptions. *Applied Optics*. 1987. Vol. 26. P. 4036–4038. doi: 10.4319/lo2003.48.1 part².0431
- Dekker A., Phinn S., Anstee J., Bissett P., Brando V., Casey B., Fearn P., Hedley J., Klonowski W., Lee Z. P., Lynch M., Lyons M., Mobley C. Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2011. Vol. 9. P. 396–425.
- EEGLE ship-collected data archive. 2003. 1, 2. CD-ROM.
- Effler S., Peng F., O'Donnell D., Strait C. The backscattering coefficient and its components in the Great Lakes: A review and synthesis. *Journal of Great Lakes Research*. 2013. Vol. 39 (supplement 1). P. 108–122.
- Gillespie R., Harrison III W. B., Grammer G. M. Geology of Michigan and the Great Lakes. *Western Michigan University Publ.* 2008. 37 p.
- GITHUB: <https://github.com/nansencenter/boreali> (accessed: 20.08.2016).
- Gordon H., Brown O. Influence of bottom depth and albedo on the diffuse reflectance of a flat homogeneous ocean. *Applied Optics*. 1974. Vol. 13, no. 9. P. 2153–2159.
- Greb S., Garrison P., Pfeiffer S. Cladophora and water quality of Lake Michigan: a systematic survey of Wisconsin nearshore areas. In: Bootsma H. A., Jensen E. T., Young E. B., Berges J. A. (Eds.), Cladophora Research and Management in the Great Lakes. Special Report 200501. Great Lakes Water Institute, University of Wisconsin, Milwaukee. 2004. 7380 p.
- Hu C. Ocean color reveals sand ridge morphology on the West Florida Shelf. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2008. Vol. 5, no. 3. P. 443–447.
- Hu C., Hackett K., Callahan M., Androut S., Wheaton J., Porter J., Mueller-Karge F. The 2002 ocean colour anomaly in the Florida Bight: A cause of local coral reef decline? *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30, no. 3. doi: 10.1029/2002GL016479
- Hu C., Mueller-Karge F., Vargo G., Neely M., Johns E. Linkages between coastal runoff and the Florida Keys ecosystem: A study of a dark plume event. *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. L15307. doi: 10.1029/2004GL020382
- Hu C., Nelson J., Johns E., Chen Z., Weisberg R., Mueller-Karge F. Mississippi River water in the Florida Straits in the gulf Stream off Georgia in summer 2004. *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. L14006. doi: 10.1029/2005GL022942
- IOCCG. Atmospheric correction for remotely-sensed ocean colour products. Wang, M. (Ed.). Reports of the International Ocean-Colour Coordination Group. 10, IOCCG Publ. Dartmouth, Canada. 2010.
- Jerome J. H., Bukat R. P., Miller J. R. Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, no. 1. P. 43–52.
- Kirk J. T. O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnology and Oceanography*. 1984. Vol. 29. P. 350–356.
- Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Folkestad A., Pettersson L. H., Sørensen K., Shuchman R. Semi-empirical Algorithm for the Retrieval of Ecology-Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments. *Algorithms*. 2009. Vol. 2. P. 470–497.
- Kutser T., Vahtmäe E., and Metsamaa L. Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2006. 55 (4). P. 329–340.
- Lee Z., Carder K., Arnone R. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, no. 27. P. 5755–5772.
- Lyzenga D. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*. 1978. Vol. 17, no. 3. P. 379–383.

Mida J. L., Scavia D., Fahnenstiel G. L., Pothoven S. A., Vanderploeg H. A., Dolan D. M. Long-term and recent changes in southern Lake Michigan water quality with implications for present trophic status, *Journal of Great Lakes Research*. 2010. Vol. 36 (Supplement 3). P. 42–49. doi:10.1016/j.jglr.2010.03.010

Maritorena S., Morel A., Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. *Limnology and Oceanography*. 1994. Vol. 39, no. 7. P. 1689–1703.

Mobley C. D., Sundman L. K., Boss E. Phase Function Effects on Oceanic Light Fields. *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, no. 6. P. 1035–1050. doi: 10.1364/AO.41.001035

More J. J., Sorensen D. C., Hillstrom K. E., Garbow B. S. The MINPACK Project, in Sources and Development of Mathematical Software, W. J. Cowell, ed., Prentice-Hall. 1984. P. 88–111.

Nalera T. F., Schloesser D. W. (Eds.). Quagga and zebra mussels: biology, impacts and control. Boca Raton. CRC Press. 2014. 761 p.

O'Reilly J. E., Maritorena S., Siegel D., O'Brien M., Toole D., Mitchell B. G., Kahru M., Chavez F., Strutton P., Cota G., Hooker S., McClain C., Carder K., Muller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G., Aiken J., Arrigo K., Letelier R., Culver M. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: O'Reilly, J. E., and 24 Coauthors. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 11, S. B. Hooker and

E. R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. 2000. P. 9–23.

Philpot W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*. 1989. Vol. 28, no. 8. P. 1569–1578.

Pozdnyakov D. V., Grassl H. Colour of Inland and Coastal Waters: a methodology for its interpretation. Chichester: Springer-Praxis, 2003. 170 p.

Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1992.

Shuchman R. A., Leshkevich G., Sayers M. J., Johengen T. H., Brooks C. N., Pozdnyakov D. An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data. *Journal of Great Lakes Research*. 2013a. Vol. 32. P. 14–33.

Shuchman R. A., Sayers M. J., Brooks C. N. Mapping and monitoring the extent of submerged aquatic vegetation in the Laurentian Great Lakes with multi-scale satellite remote sensing. *Journal of Great Lakes Research*. 2013b. Vol. 39. P. 78–89.

Shuchman R., Korosov A., Hatt C., Pozdnyakov D., Means J., Meadows G. Verification and application of a bio-optical algorithm for Lake Michigan using SeaWiFS: a 7-year inter-annual analysis. *Journal of Great Lakes Research*. 2006. Vol. 32. P. 258–279.

Received August 22, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Коросов Антон Андреевич

научный сотрудник, руководитель группы дистанционного зондирования морского и материкового льда, к. ф.-м. н. Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена Берген, Норвегия
эл. почта: anton.korosov@nersc.no

Поздняков Дмитрий Викторович

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

Шухман Роберт

директор, PhD Мичиганский технический исследовательский институт Анн-Арбор, США
эл. почта: shuchman@mtu.edu

Сайерс Михаэл

научный сотрудник Мичиганский технический исследовательский институт Анн-Арбор, США
эл. почта: mjsayers@mtu.edu

CONTRIBUTORS:

Korosov, Anton

Nansen Environmental and Remote Sensing Center Thormøhlens gate, 47, N-5006, Bergen, Norway
e-mail: anton.korosov@nersc.no

Pozdnyakov, Dmitry

Scientific foundation "Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre" 14th Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034 St. Petersburg, Russia
e-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

Shuchman, Robert

Michigan Tech Research Institute 3600 Green Court, Suite 100, MI 48105, Ann Arbor, USA
e-mail: shuchman@mtu.edu

Sayers, Michael

Michigan Tech Research Institute 3600 Green Court, Suite 100, MI 48105, Ann Arbor, USA
e-mail: mjsayers@mtu.edu

Соутелл Рейд

научный сотрудник
Мичиганский технический исследовательский институт
Анн-Арбор, США
эл. почта: rwsawtel@mtu.edu

Моисеев Артем Владимирович

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

Sawtell, Reid

Michigan Tech Research Institute
3600 Green Court, Suite 100, MI 48105, Ann Arbor, USA
e-mail: rwsawtel@mtu.edu

Moiseev, Artem

Scientific foundation "Nansen International Environmental
and Remote Sensing Centre"
14th Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island,
199034 St. Petersburg, Russia
e-mail: artem.moiseev@niersc.spb.ru

УДК 556.555.7+574

МОДЕЛИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов²

¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Предлагается новый подход, позволяющий моделировать сложные нелинейные природные процессы, включая и процессы самоорганизации, используя так называемые клеточные автоматы для создания компьютерной модели распространения консервативной примеси, оценки загрязнения водоема и термического режима Ладожского озера. Задачи моделирования решаются по пути их последовательного усложнения: от точечной по вертикали модели глубоководного района озера к двумерной, для продольного разреза озера, и, наконец, к трехмерной модели всего водоема. Созданные модели рассчитаны на возможность их дальнейшего расширения за счет введения в них гидрохимических и гидробиологических переменных для моделирования экосистем озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро; компьютерная модель; клеточные автоматы; распространение загрязнений; термический режим; перемешивание.

V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. MODELS OF LAKE LADOGA BASED ON THREE-DIMENSIONAL CELLULAR AUTOMATA

A new approach for modeling complicated nonlinear processes, including processes of self-organization, using so-called cellular automata is suggested. A computer model of the distribution of persistent impurities, assessment of pollution and thermal regime of Lake Ladoga was built as an example. Modeling problems are solved successively from simple to more complex ones: from a zero-dimensional vertical model of the lake's deep-water area to a two-dimensional model for the lake's longitudinal section and, finally, three-dimensional model of the entire water body. The generated models are designed so that they can be further expanded to include hydrochemical and hydrobiological variables for simulating lake ecosystems.

Keywords: Lake Ladoga; a computer model; cellular automata; pollution propagation; thermal regime; mixing.

Введение

Построению и исследованию имитационных моделей экологической системы озера посвящена обширная литература [Астраханцев и др., 2003; Rukhovets, Filatov, 2010; Меншуткин

и др., 2013]. Все варианты этих моделей представляют собой детерминированные системы, построенные на основе законов сохранения вещества и энергии. Подобная парадигма в гидродинамической и термической части модели основывается на численном решении

уравнений Навье – Стокса, а в биологической – на уравнениях продукционной гидробиологии [Алимов, 2000]. Подобный подход оказался результативным при изучении антропогенного эвтрофирования экосистемы озера. Однако при переходе к проблеме комплексного использования природных ресурсов озер и водохранилищ, включающего не только сохранение или восстановление качества воды, но и использование их для водного транспорта, туризма, рыбного хозяйства, электроэнергетики, такой подход оказался недостаточным. Дело не только в том, что потоки вещества, которыми оперирует рыбохозяйственная наука и практика, находятся в пределах ошибки определения первичной продукции водоема, но и в ущербности самого детерминированного подхода к описанию процессов, происходящих в экологической системе водоема. Создание моделей, основанных на решении систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, – достаточно сложная задача [Меншуткин и др., 2013], поэтому в качестве альтернативы предлагаются новые

подходы. Среди них – методы нечетких множеств, искусственного интеллекта, логико-лингвистические и когнитивные модели, которые создаются и используются прежде всего в тех случаях, когда уровень знаний о моделируемых процессах или явлениях не позволяет применять формальный аппарат или когда отношения между объектами в модели не имеют количественной оценки и регулируются только причинно-следственными связями [Меншуткин и др., 2013]. Изложенные выше соображения привели к попытке применения для описания процессов, происходящих в водных экологических системах, математического аппарата, существенно отличающегося от традиционного использования дифференциальных уравнений, а именно стохастических клеточных автоматов [Тиффоли, Морголис, 1991]. Идея клеточных автоматов сформулирована в конце сороковых годов XX века Джоном фон Нейманом и Конрадом Цусе [см. Астафьев и др., 2003]. Гидробиологические и ихтиологические интерпретации с использованием математического аппарата дискретной математики представляются

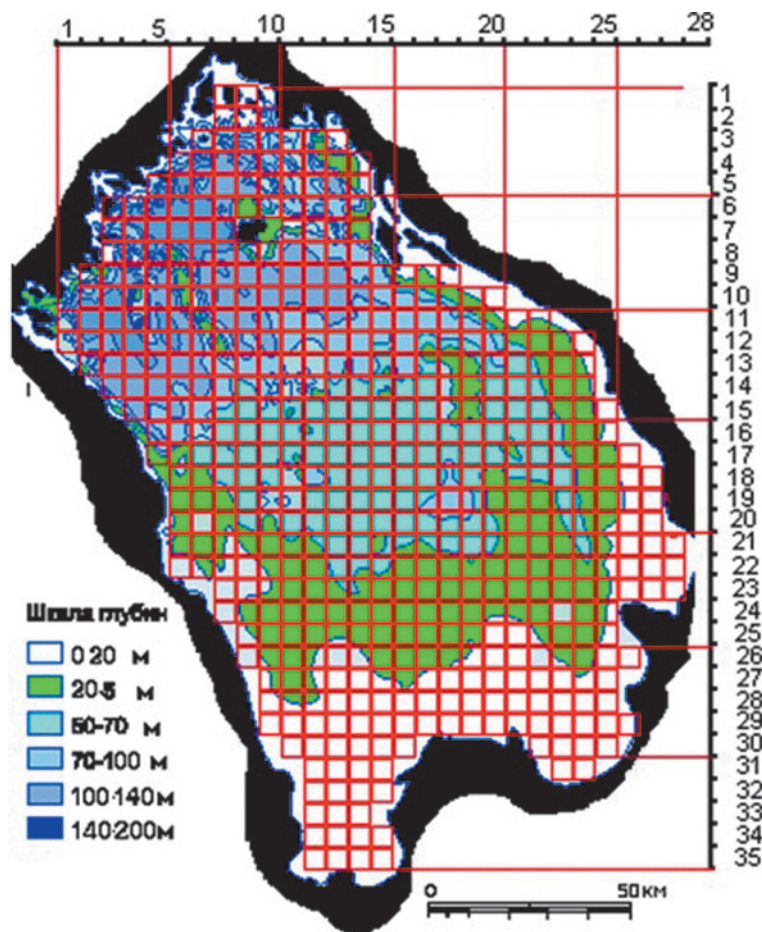


Рис. 1. Сетка расположения клеточных автоматов по акватории Ладожского озера. Схематично показана карта глубин озера

вполне естественными ввиду фундаментальной дискретности самого понятия жизни [Ляпунов, 1968]. Для термогидродинамики и экосистем озер эффективным может быть использование моделей клеточно-автоматных (КА – cellular automata), позволяющих моделировать сложные нелинейные процессы, включая и процессы самоорганизации, используя сравнительно простые правила [Wolfram, 2002]. По существу, это означает переход от традиционного метода описания экологической системы с помощью системы дифференциальных уравнений к использованию представлений дискретной математики. Метод нашел практическое применение при моделировании наземных сообществ, нейронных сетей, передаче энергии в пограничном слое движущегося газа или жидкости, а также был использован для моделирования биоты в озере Байкал и Онежском озере [Афанасьев, 2012; Меншуткин, Филатов, 2016]. Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. На каждой итерации, используя правила перехода и состояния соседних ячеек, определяется новое состояние каждой ячейки. В случае экологической системы пространство разбивается на множество дискретных объемов воды, характеризующихся температурой, плотностью, освещенностью, концентрациями растворенного в воде кислорода, биогенов в виде

неорганических соединений фосфора и азота, а также биомассы фито-, бактерио- и зоопланктонных организмов. Основное свойство клеточных автоматов заключается в том, что каждый такой автомат может изменять свое состояние не только в зависимости от своего предыдущего состояния и внешних воздействий, но и в зависимости от состояния соседних автоматов.

Отметим и недостатки метода. Из-за сложности непосредственного измерения ряда параметров вихревых течений, пульсаций вертикальной составляющей скорости нельзя провести прямую идентификацию моделей, что заставляет пользоваться косвенными методами.

1. Модель распространения загрязняющих примесей

Разработку модели Ладожского озера с применением аппарата клеточных автоматов начнем с простейшего случая имитации процесса распространения загрязняющей примеси по акватории озера. Ограничимся в первом приближении только рассмотрением поверхностного слоя воды. Разобьем этот слой на квадраты размером 5 на 5 км, как это показано на рисунке 1. Всего таких ячеек получается 519. В каждой такой ячейке располагается автомат, состояние которого в каждый момент определяется концентрацией в воде загрязняющей

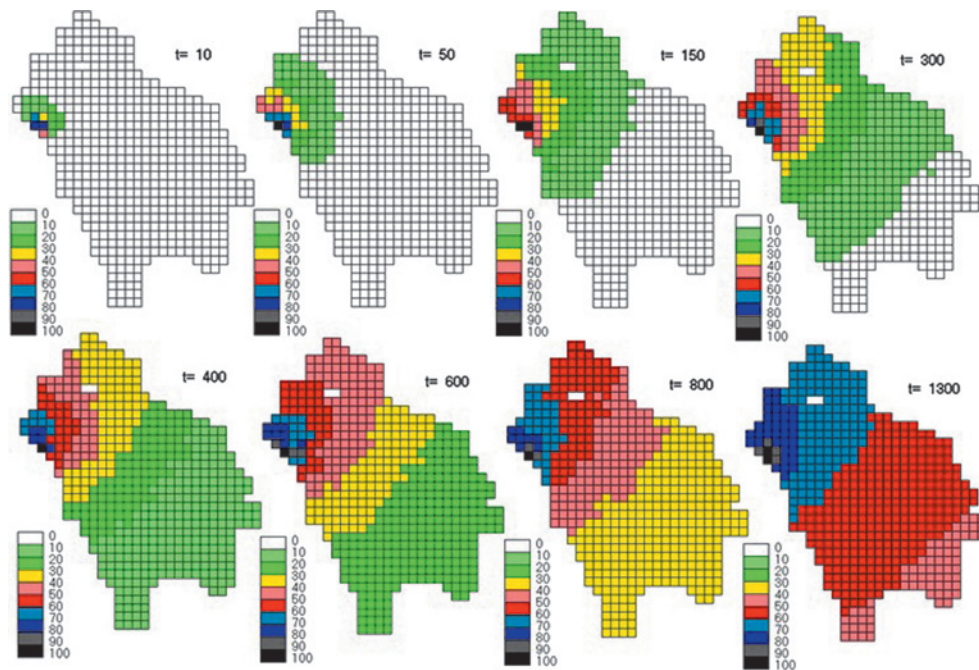


Рис. 2. Компьютерный эксперимент, имитирующий распространение загрязняющей примеси в поверхностном слое Ладожского озера от постоянного источника. Концентрации в 100-балльной шкале



Рис. 3. Блок-схема программы интерпретации трехмерной модели распространения загрязняющей примеси в Ладожском озере

примеси. Эта концентрация определяется в дискретной 100-балльной шкале, что вполне достаточно при реальной точности измерений. Свойство определения соседа каждого автомата примем согласно правилу фон Неймана, по которому соседними считаются только автоматы, имеющие общие ребра.

При рассмотрении только одного слоя автоматов функция их перехода в следующее временное состояние заключается в том, что концентрация загрязняющей примеси в соседних автоматах выравнивается. При этом соблюдается закон сохранения вещества, поскольку примесь считается консервативной, т. е. не участвующей в химических реакциях и процессах осаждения на дно. Выбор пары взаимодействующих автоматов осуществляется в два этапа. Сначала выбирается индекс первого автомата, исходя из предположения о равной вероятности срабатывания каждого из 519 автоматов. Программно это осуществляется при помощи датчика случайных чисел. После этого индекс соседнего автомата выбирается исходя из определения соседа и равной вероятности выбора возможных соседей. На рисунке 2 представлены результаты компьютерного эксперимента по определению последствий действия на озеро постоянного источника загрязнений, расположенного в районе Приозерска.

При принятой интенсивности горизонтального турбулентного перемешивания для распространения загрязнений из Приозерска по всему озеру требуется около года. Для практического использования созданной модели необходима ее калибровка по результатам натуральных экспериментов с наблюдениями за

распространением красителя или иного трасирующего вещества в акватории озера. Такие эксперименты проводились в Ладожском озере [Филатов, 1983]. После рассмотрения плоской задачи турбулентной диффузии, которая носила иллюстративный характер и была призвана показать простоту автоматного подхода, логично перейти к более сложной пространственной задаче. Блок-схема программы для реализации такого подхода представлена на рисунке 3.

Здесь процесс имитации турбулентной диффузии разбивается на два этапа: горизонтальный и вертикальный перенос. Для простоты принято, что по вертикали в самом глубоком месте Ладожского озера размещается 11 автоматов (горизонтов).

На первом этапе процедура, описанная выше для одного слоя, повторяется для каждого слоя. По мере увеличения глубины число автоматов в слое сокращается. Более того, по мере роста глубины слои могут потерять свойство связности, что отражает сложность подводного рельефа озера, характерного для северной Ладоги. Второй этап, как и первый, начинается со случайного выбора поверхностного автомата, но дальнейший выбор соседнего автомата производится уже не по горизонтали, а по вертикали. Естественно, что интенсивность вертикального турбулентного перемешивания существенно отличается от интенсивности горизонтального обмена. В неявной форме это учитывается неравенством горизонтального и вертикального размеров ячейки, которую занимает автомат в водной массе озера.

Иллюстрация функционирования трехмерной модели представлена на рисунке 4. Из-за

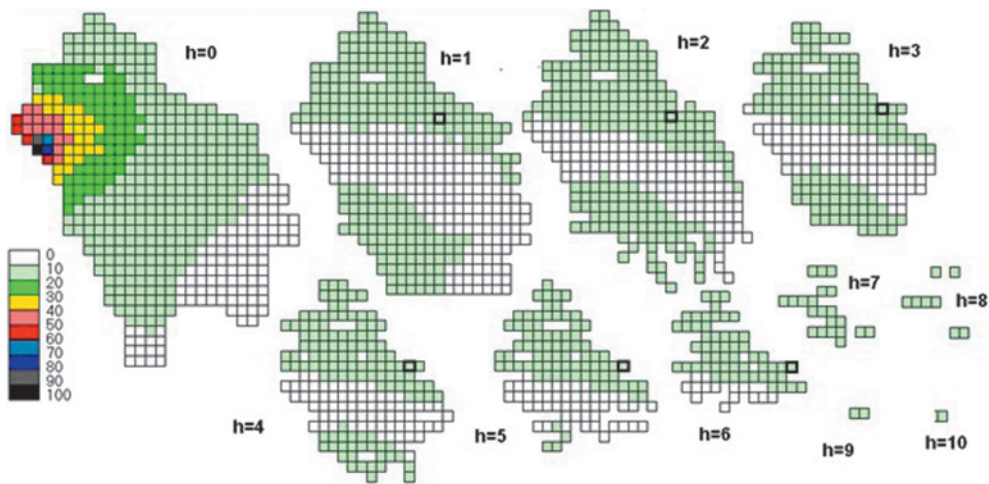


Рис. 4. Распространение загрязняющей примеси при использовании трехмерной модели из 11 слоев (h) клеточных автоматов. Состояние модели соответствует 100-му временному шагу от начала выпуска загрязнений из района Приозерска

громоздкости материала ограничимся демонстрацией состояния всех автоматов (их всего 1939), составляющих модель, только для одного момента времени. При оценке результатов моделирования следует иметь в виду, что мы имеем дело со стохастической моделью, а материал, представленный на рисунке 4, соответствует лишь одной реализации случайного процесса. Для получения полной картины функционирования модели необходимо применение метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

2. Точечная модель термического режима глубоководной части Ладожского озера

Прежде чем переходить к трехмерной модели термического режима Ладожского озера, целесообразно рассмотреть частный случай в виде точечной вертикальной модели, в которой игнорируется адвективный перенос тепла. Исходным материалом для построения такой модели служили данные из атласа Ладожского озера [Ладожское озеро..., 2015] по средним многолетним распределениям температуры воды в глубоководном районе озера.

Модель представляет собой прямоугольную сетку размером 120 ячеек по вертикали и 100 ячеек по ширине. Обойтись одним вертикальным столбом из 120 автоматов не представляется целесообразным, т. к. предполагается использование двумерных элементарных вихрей. Такая сетка обеспечивает разрешение по вертикали в 1 мм, что соответствует минимальному размеру моделируемых вихрей. В каждой ячейке расположен автомат, состояние которого соответствует температуре воды в данный

момент времени. Функция перехода каждого автомата зависит от состояний соседних четырех автоматов, исключение составляют автоматы в крайних ячейках, где число связей уменьшается до трех. При построении дискретных имитационных моделей в динамике озер большую роль играет элементарный вихрь. Под этим термином понимается двух- или трехмерный клеточный автомат минимальных размеров, способный к имитации передачи вещества и энергии в водной массе. На рисунке 5 представлена схема плоского элементарного вихря.

Состояние плоского вихря определяется значениями температуры воды по углам занимаемой им площадки (T_{11} , T_{21} , T_{31} и T_{41}), а также интенсивностью вихря V . Потoki между четырьмя областями вихря (V_{12} , V_{23} , V_{34} и V_{41}) равны между собой и соответствуют интенсивности вихря. Первый индекс величины V означает

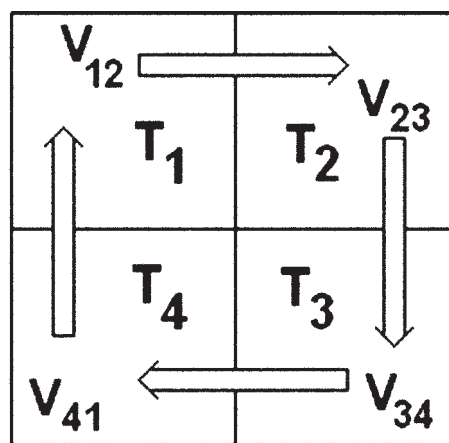


Рис. 5. Схема плоского элементарного вихря. T – температура воды, V – поток воды между соседними автоматами

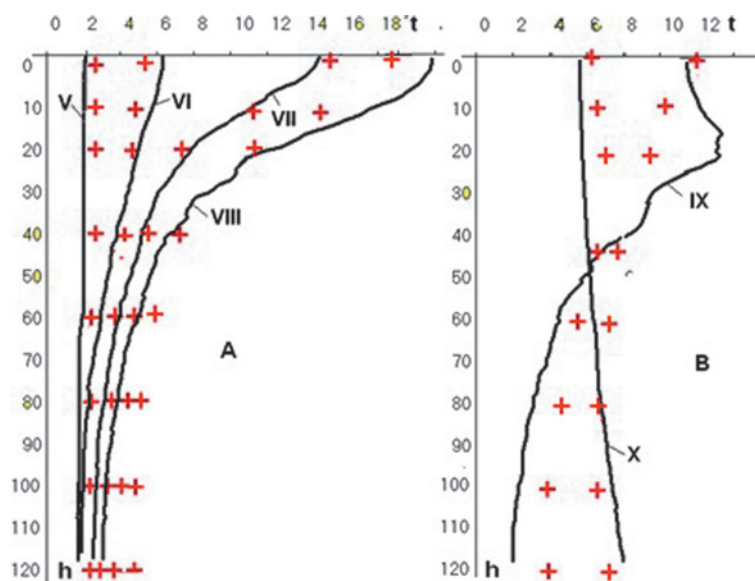


Рис. 6. Результаты моделирования термики в глубоководной части Ладожского озера (сплошные линии) и осредненные многолетние данные (крестики) в период прогрева (А) и охлаждения (В) озера

индекс области, откуда течет вода, а второй – куда она течет. Величина интенсивности может изменяться от нуля до единицы.

Работа программы реализации модели начинается с имитации состояния озера на первое июня. Для возможности реализации мелкомасштабных вихрей временной шаг в одни сутки пришлось выполнять за 24 почасовых шага. Интенсивность турбулентности (R) определялась числом вихрей, возникающих в течение этого времени. Возможности персонального компьютера позволяли имитировать до 50 000 вихрей, что оказалось достаточным. Для каждого вихря определялись его координаты и направление вращения. В качестве первого приближения принималось, что все вихри имеют минимальные размеры и распределены по глубине равномерно. Направление вращения вихря (по часовой стрелке или против нее) также определялось при помощи датчика случайных чисел с вероятностью 0,5.

Имитация теплового потока через поверхность озера при отсутствии ледяного покрова (солнечная радиация) считалась проникающей по экспоненциальному закону на глубины не более 2 м. Предполагалось, что тепловыми потоками между водной массой и данными отложениями можно пренебречь. Для упрощения калибровки модели предполагалось, что параметры теплового взаимодействия озера с атмосферой (QT) и интенсивность турбулентности (R) изменялись с дискретностью в один месяц.

На рисунке 6 представлены вертикальные профили температуры, полученные при исследовании модели, и соответствующие им данные из атласа Ладожского озера.

На рисунках вертикального распределения температур показана не только кривая самой функции температуры, но и область ее изменчивости по результатам моделирования методом Монте-Карло. Этот результат получен многократным прогоном модели порядка 100 реализаций с последующей статистической обработкой. Такое сопоставление измеренных (данные атласа) и смоделированных значений температуры воды не вполне корректно, т. к. в модели фигурируют данные для конкретных суток одной реализации случайного процесса, а в атласе приводятся средние многолетние величины. Обращает на себя внимание тот факт, что модель достаточно реалистично описывает период прогрева водных масс, не демонстрирует существенные расхождения с натурными наблюдениями температуры. Очевидно, это связано с тем, что интенсивность турбулентного перемешивания в осенний период на половину порядка выше, чем в начале лета.

3. Двухмерная модель термического режима Ладожского озера (продольник)

Дальнейшее развитие автоматных моделей Ладожского озера заключается в переходе от точечных моделей к плоскостным представлениям. По обилию и подробности наблюдений

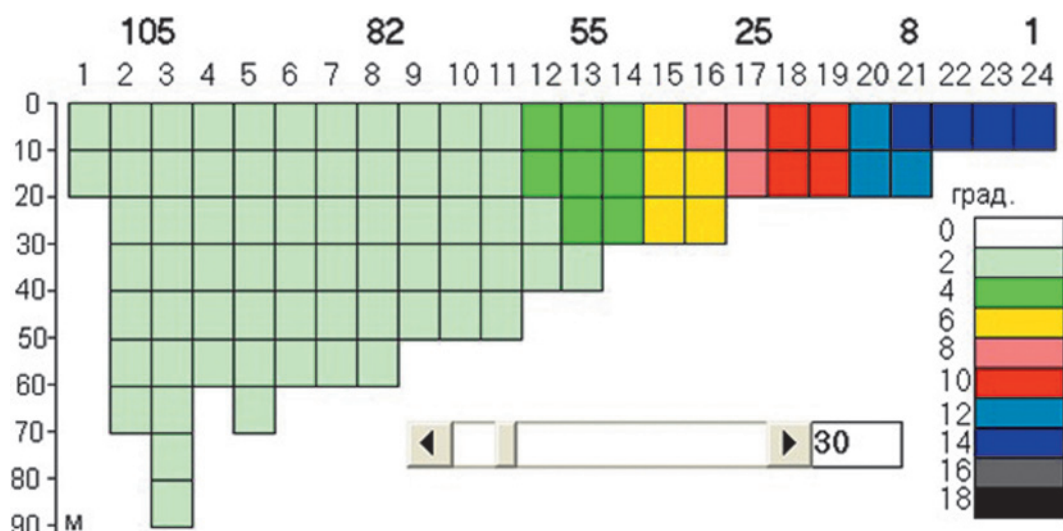


Рис. 7. Распределение температур воды по продольному разрезу в конце мая ($t = 30$).
Наверху приведены номера станций [Ладожское озеро..., 2015]

целесообразно использовать продольный разрез с севера на юг (от Новой Ладоги до Якимварского залива), который регулярно и многократно повторялся во время работ, проводимых Ладожской экспедицией Института озероведения РАН. Выбор автоматов для такой модели представлен на рисунке 7.

Поскольку наблюдения на продольном разрезе велись не круглый год, а только при отсутствии ледяного покрова, то функционирование модели ограничивается периодом с мая по декабрь. Конструкция модели повторяет устройство точечной модели, описанной в предыдущем разделе, с добавлением неоднородности глубины и теплового потока через поверхность не только по времени, но и по горизонтали.

Величины теплового потока через поверхность озера принимались по результатам расчетов теплового баланса Ладожского озера, проведенных Н. П. Смирновой [Ладожское озеро..., 2015]. Интенсивности вертикального и горизонтального турбулентного перемешивания для каждого месяца подбирались исходя из требования минимизации расхождений между данными модели и средними многолетними данными, приводимыми в атласе Ладожского озера. Среднее отклонение от модельных данных и данных по шести станциям продольного разреза не превышало $0,4^{\circ}\text{C}$. Результаты работы модели представлены на рисунке 7, на котором виден эффект термобара. Движение термобара наглядно видно при работе программы в режиме анимации. Для более подробного модельного воспроизводства этого явления необходима более густая сетка клеточных автоматов, как по глубине, так

и по горизонтали. Исследование представленной модели подтвердило вывод, полученный на точечной модели, о том, что интенсивность турбулентного перемешивания в осеннее время существенно превышает эту величину в период весенней гомотермии. Для осредненных многолетних данных о температурном режиме Ладожского озера, которые использованы в настоящей модели, эта разница соответствует трехкратному превышению интенсивности вихревого перемешивания в осеннее время по сравнению с весной.

4. Пространственная трехмерная модель термического режима Ладожского озера

При переходе от модели, рассмотренной в предыдущем разделе, к трехмерной модели Ладожского озера, необходимо установить схему районирования акватории озера для создания компактного представления параметров. Первоначально использовалась схема, предложенная Ф. А. Черняевой, в рамках которой в атласе [Ладожское озеро..., 2015] приведены данные по тепловому балансу озера. Однако в процессе отладки модели выяснилась формальность предложенного районирования, которая приводила к неправдоподобным картинкам распределения температур воды по акватории озера. Переход к районированию по глубинам, предложенный М. А. Фламенко [Ладожское озеро..., 2015], позволил существенно улучшить качество модели.

Структура программы, предназначенной для реализации пространственной модели термического режима Ладожского озера (рис. 8),



Рис. 8. Блок-схема программы для реализации пространственной модели термического режима Ладожского озера

в общих чертах аналогична программе модели распространения консервативной примеси, рассмотренной в разделе 1 настоящей работы.

Обратим внимание на то, что в начале каждого временного шага автоматы верхнего слоя получают или отдают тепло в результате взаимодействия озера и атмосферы. Основой для оценки этих потоков тепла послужили данные, приведенные в атласе Ладожского озера, однако в процессе численных экспериментов с моделью выяснилась необходимость калибровки этих данных. Процедура перемешивания в горизонтальной плоскости при помощи имитации вихревых перемещений воды между соседними автоматами проводилась в модели только для четырех верхних слоев, поскольку в глубинных частях озера появлялись изолированные впадины, в которых актуальным оказывалось только вертикальное перемешивание. При моделировании вертикального турбулентного

перемешивания в районе мелководья предполагалось полное перемешивание. В областях с большими глубинами положение единичного вихря по вертикали полагалось равновероятным по всему столбу воды. Такое допущение справедливо только в условиях, близких к гомотермии, а при наличии термоклина было бы целесообразнее учитывать зависимость интенсивности турбулентного обмена от глубины.

Процесс калибровки модели заключался в подборе коэффициентов интенсивности вертикального и горизонтального турбулентного перемешивания для каждого месяца исходя из требования наилучшего приближения полученных в модели распределений температур к средним многолетним данным [Ладожское озеро..., 2015]. Для сравнения были выбраны данные по продольному разрезу, как наиболее надежные и информативные.

Программной реализацией модели предусмотрена возможность вывода информации

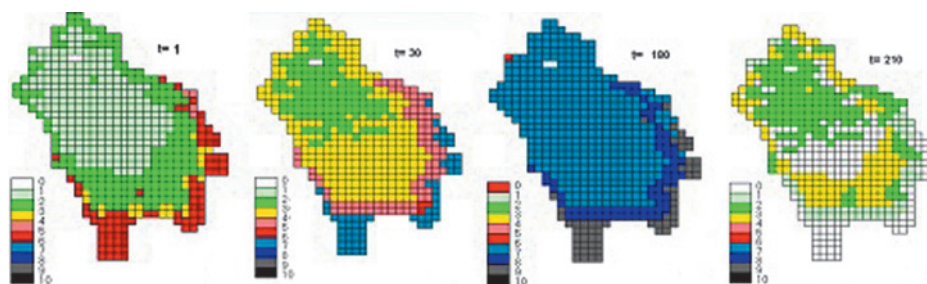


Рис. 9. Сезонный ход распределения поверхностных температур Ладожского озера по данным компьютерного эксперимента ($t = 1$ – май, $t = 30$ – июнь, $t = 180$ – август, $t = 210$ – декабрь)

о состоянии озера на каждые сутки по всем горизонтам, а также вертикального распределения температуры под любой из 519 точек акватории озера, представленных в модели (рис. 9).

Поскольку созданная модель является стохастической, то ее функционирование оценивалось не по одной реализации, а с использованием метода Монте-Карло. Было установлено, что отклонение от средних значений температур не превышает 2–3 °С, что вполне сопоставимо с межгодовыми различиями по данным натурных наблюдений.

Заключение

Разработанная модель Ладожского озера демонстрирует реальную возможность создания модели гидродинамики и термики крупного озера с вертикальной стратификацией не на основе решения системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса, а путем компьютерной имитации процесса турбулентной диффузии с применением аппарата клеточных автоматов. Это создает предпосылки для построения моделей конкретных водоемов. Число клеточных автоматов, особенно по вертикали вблизи границы вода-воздух, можно увеличить, ориентируясь на вычислительные возможности современных персональных компьютеров. Допущение о существовании вихрей только одного размера было сделано исключительно из соображений экономии машинного времени, а не из современного представления о структуре турбулентного потока. Тем более что в предварительных вариантах модели с малым числом автоматов была отработана схема из комплекса вихрей разного размера, начиная от величин, сопоставимых с размерами водоема.

Функционирование разработанной модели и опыт построения модели экосистемы подледного периода для Онежского озера [Меншуткин, Филатов, 2016] открывают реальную возможность круглогодичного замыкания модели термического режима Ладожского и других крупных стратифицированных озер. Сопоставление разработанной модели с моделью, построенной на основе уравнений Навье – Стокса для того же Ладожского озера [Астраханцев и др., 2003] и на основании того же самого фактического материала, позволяет оценить достоинства и недостатки этих моделей. В предлагаемой модели Ладожского озера сделаны предположения о структуре турбулентного перемешивания, поэтому получение правдоподобных результатов следует

считать обнадеживающим. Достоинство предлагаемого метода моделирования заключается, в частности, в простоте программной реализации. Аппарат клеточных автоматов хорошо приспособлен для описания гидрохимических и гидробиологических процессов, происходящих в озерах. Собственно, своим появлением клеточные автоматы обязаны задаче моделирования систем, способных к самовоспроизведению [Астафьев и др., 2003]. Это открывает перспективы расширения гидродинамических моделей на всю экологическую систему водоема.

Литература

- Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экологических систем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
- Астафьев Г. Б., Короновский В. А., Храмов А. Б. Клеточные автоматы. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2003. 120 с.
- Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2003. 362 с.
- Афанасьев И. В. Клеточно-автоматная модель динамики численности организмов озера Байкал // Прикладная дискретная математика. 2012. № 1. С. 261–267.
- Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
- Ляпунов А. А. О математическом подходе к изучению жизненных явлений // Математическое моделирование жизненных явлений. М.: Мысль, 1968. С. 65–100.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. СПб.: Нестор-История, 2013. 120 с.
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Модель подледной экологической системы озера, основанная на применении клеточных автоматов // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 76–87. doi: 10.17076/lim329
- Тиффоли Е., Морголис Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. 280 с.
- Филатов Н. Н. Динамика озер. М.: Наука, 1983. 166 с.
- Annual Report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lousanne; Petrozavodsk, 2015. 143 p.
- Rukhovets L. A., Filatov N. N. Lake Ladoga and Onego: Great European Lakes. Springer-Praxis. 2010. 302 p.
- Wolfram S. A new kind of science. USA Wolframs Media. 2002. 1197 p.

Поступила в редакцию 06.02.2017

References

Alimov A. F. Elementy teorii funktsionirovaniya vodnykh ekologicheskikh sistem [Elements of aquatic ecosystems functioning theory]. St. Petersburg: Nauka, 2000. 147 p.

Astaf'ev G. B., Koronovskii V. A., Khramov A. B. Kletochnye avtomaty [Cellular automata]. Saratov: Izd-vo GosUNTs «Koledzh», 2003. 120 p.

Astrakhantsev G. P., Menshutkin V. V., Petrova N. A., Rukhovets L. A. Modelirovanie ekosistem bol'shikh stratifitsirovannykh ozer [Simulation of large stratified lakes ecosystems]. St. Petersburg: Nauka, 2003. 362 p.

Afnas'ev I. V. Kletочно-автоматная модель динамики численности организмов озера Байкал [Cellular automata model of population dynamics of Lake Baikal organisms]. Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied Discrete Mathematics]. 2012. No. 1. P. 261–267.

Filatov N. N. Dinamika ozer [Lakes dynamics]. Moscow: Nauka, 1983. 166 p.

Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya. Atlas [Lake Ladoga and landmarks of its coast. Atlas]. Ed. V. A. Rumyantsev. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015. 200 p.

Lyapunov A. A. O matematicheskom podkhode k izucheniyu zhiznennykh yavlenii [On the mathematical approach to the study of life phenomena]. Matematicheskoe modelirovanie zhiznennykh yavlenii

[Mathematical Modeling of Life Phenomena]. Moscow: Mysl', 1968. P. 65–100.

Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya modelirovaniya ekosistem presnovodnykh ozer. Ispol'zovanie modelei dlya resheniya zadach sokhraneniya ikh vodnykh resursov [Current state and prospects of freshwater lakes ecosystems modeling. Models for water resources protection]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. 120 p.

Menshutkin V. V., Filatov N. N. Model' podlednoi ekologicheskoi sistemy ozera, osnovannaya na primeneni kletochnykh avtomatov [Model of subglacial lake ecosystem based on cellular automata]. Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]. 2016. No. 5. P. 76–87. doi: 10.17076/lim329

Tiffoli E., Morgolis N. Mashiny kletochnykh avtomatov [Cellular automata machines]. Moscow: Mir, 1991. 280 p.

Annual Report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lousanne; Petrozavodsk, 2015. 143 p.

Rukhovets L. A., Filatov N. N. Lake Ladoga and Onego: Great European Lakes. Springer-Praxis. 2010. 302 p.

Wolfram S. A new kind of science. USA Wolframs Media. 2002. 1197 p.

Received February 06, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Меншуткин Владимир Васильевич

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.
Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН
ул. Сызранская, 28–1, Санкт-Петербург, Россия, 191187
эл. почта: menshutkina.n@gmail.com

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник, чл.-корр. РАН,
д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Menshutkin, Vladimir

St. Petersburg Institute for Economics and Mathematics,
Russian Academy of Sciences
28–1 Syzranskaya St., 191187 St. Petersburg, Russia
e-mail: menshutkina.n@gmail.com

Filatov, Nikolai

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

УДК 550.4.08

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГУМУСНОСТИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В работе проведен анализ связи гумусности озер гумидной зоны, как одного из основных показателей качества воды, с морфометрическими особенностями их водосборной территории. Современные данные о строении водосборной территории исследованных озер получены с помощью геоинформационной системы (ГИС) путем обработки цифровой модели рельефа Земли (ЦМР), растровых топографических карт местности масштаба 1:100 000 и векторных карт. Обнаружена тесная связь между гумусностью воды и залесенностью водосборного бассейна. На ее основе построена модель, позволяющая выполнять прогнозирование гумусности воды по некоторым параметрам водосборных бассейнов озер. Параметры водосборных бассейнов определяются с помощью ГИС. Доверительный интервал прогнозируемого значения составил ± 6 ед. гумусности с вероятностью 0,95 при сезонном ее колебании ± 3 ед.

Ключевые слова: качество воды; гумусность; морфометрические характеристики; водосборный бассейн; ГИС; ЦМР.

M. B. Zobkov. PREDICTING THE HUMUS CONTENT OF NATURAL WATERS THROUGH GIS MODELLING

The paper investigates the relationship between water humus content and the catchment's morphometry. Contemporary watershed data were obtained by digital elevation model (DEM) processing, from 1:100 000 raster topographic maps and vector maps with the aid of geographical informational system (GIS) software. Strong correlation was found to exist between water humus content in lakes and forest coverage of the catchment. On the basis of this relation a model was developed which allows predicting the humus content of lakes relying on some of their watershed characteristics determined with the help of GIS tools. The confidence interval for this prognosis was ± 6 units of humus content ($\alpha = 0.95$), while its seasonal variation was ± 3 units ($\alpha = 0.95$).

Keywords: water quality; humus content; morphometric characteristics; catchment area; GIS; DEM.

Введение

Одним из основных компонентов поверхностных вод гумидной зоны является органическое вещество (ОВ), которое не только в значительной степени определяет их специфику,

но и сказывается на количестве и миграции других компонентов (биогенных элементов, Fe, Mn и др.), а также влияет на газовый режим и pH воды. Для ОВ природных вод характерна очень высокая вариабельность как косвенных характеристик его содержания (перманганатная

окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), цветность (ЦВ)), так и концентрации органического углерода ($C_{орг}$). Поскольку перечисленные косвенные характеристики отражают содержание ОВ в воде, наблюдается высокая степень корреляции между ними [Лозовик, 2006]. Для комплексной характеристики содержания ОВ в воде был введен показатель ее гумусности [Лозовик, 2006], который определяется как среднее геометрическое цветности воды и перманганатной окисляемости:

$$Hum = \sqrt{ЦВ \cdot ПО}.$$

Поскольку количество водных объектов в гумидной зоне очень велико, то для их комплексного изучения требуется разработка методов дистанционной оценки природного качества воды и ее прогнозирование на основе картографической информации и данных дистанционного зондирования Земли.

Для изучения связей между химическими показателями воды и характеристиками водосборной территории требуется, во-первых, получить репрезентативную выборку объектов, наиболее широко отражающих диапазон изменения изучаемых величин, а во-вторых, минимизировать внешнее влияние, не учитываемое в рассматриваемой модели, в частности, антропогенное загрязнение. Поскольку территория Республики Карелия характеризуется высокой плотностью озерно-речных систем и малой хозяйственной освоенностью, а доля загрязненных водных объектов здесь сравнительно мала [Зобков, 2012], это позволяет сформировать конечный список водных объектов, наиболее полно отражающих спектр изменения как химического состава воды, так и особенностей морфометрического строения их водосборной территории.

Работы в этом направлении предпринимали Jan-Olov Andersson и Lars Nyberg [2008, 2009]. Ими исследовалось влияние характеристик водосборной территории на содержание растворенного органического углерода и других химических показателей качества воды в водотоках. Авторам удалось получить высокие корреляции некоторых из этих показателей для водосборов площадью от 1,5 до 4 км² [Andersson, Nyberg, 2009], в то время как для меньших водосборов (от 0,5 до 1,5 км² [Andersson, Nyberg, 2008]) значимых связей найти не удалось. Потенциально отсутствие значимых связей для малых водосборов может быть обусловлено высокой сезонной изменчивостью химического состава воды малых водотоков, на которых проводились измерения.

В данном исследовании в качестве объектов изучения были выбраны озера, поскольку они являются более инертными системами, нежели водотоки, что способствует более плавным изменениям в химическом составе их вод и позволяет получить репрезентативные результаты при сезонном графике отбора проб. Критерий выбора объектов исследования также принципиально отличался от подхода шведских ученых. Вместо классификации водных объектов по площади водосбора, имевшей место у Andersson и Nyberg, нами объекты выбирались по химическим показателям качества их воды.

Материалы и методы

Число озер, расположенных на территории Республики Карелия, по разным подсчетам, достигает 60 000, и каждое из них в своем роде индивидуально по химическому составу воды. Поэтому выбор ограниченного числа водных объектов, в полной мере отражающих их природное разнообразие, является нетривиальной научной задачей. Объекты выбирались с учетом многих факторов, таких как степень антропогенного влияния, доступность, удобство для проведения полевых исследований и др. Однако основным требованием являлось максимальное отражение всего разнообразия химических типов поверхностных вод региона в конечной выборке доступных для обследования водных объектов.

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН ведет наблюдение за водными объектами Республики Карелия с 1946 года. За это время накоплен огромный массив информации, хранящийся как на бумажных, так и на электронных носителях. Составленная по этим материалам база гидрохимических данных включает в себя общую информацию о водном объекте, химические и физико-химические показатели качества воды: электропроводность, температуру, содержание взвешенных веществ, прозрачность, ионный состав (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^-), щелочность, цветность, ПО, ХПК, БПК₅, БПК₂₀, хлорофилл *a*, содержание органического углерода, биогенных ($N_{орг}$, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , $P_{взвеш}$, $P_{мин}$, $P_{общ}$) и литофильных (Si, Fe (II), $Fe_{общ}$, $Fe_{взвеш}$, Mn, Al) элементов, фторидов, концентрацию кислорода и CO₂, pH воды, а также информацию о загрязняющих веществах: тяжелых металлах (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Li, Cr), нефтепродуктах, лигносульфонатах, фенолах и др. В базе данных содержится информация о химическом составе воды 522 озер. Однако, поскольку информация, входящая в эту базу, была получена в различные по водности

Таблица 1. Гумусность воды (усл. ед.) группы модельных озер в различные сезоны года

Название озера	Кадастровый №	Весна	Лето	Осень	Зима
Салонъярви	1639	55	47	79	68
Вегарус	1645	48	39	52	42
Крошнозеро	1695	30	27	24	34
Святозеро	1728	12	16	9	9
Урозеро	1750	3	3	6	3
Урос	1803	6	6	7	4
Вендюрское	1804	15	13	13	9
Яндомозеро	1858	10	13	27	12

годы и в различные гидрологические сезоны, непосредственное ее применение для достижения поставленных в настоящей работе целей представляется затруднительным. Поэтому указанная база данных использовалась нами для предварительного выбора объектов исследования.

Исходные данные были обработаны с помощью программы для ЭВМ Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов» [Зобков, 2010], в результате чего проведена геохимическая классификация всех занесенных в базу озер по щелочности, гумусности и уровню трофии [Лозовик, 2013].

Геохимическая классификация вод предсказывает существование 67 комбинаций щелочности, гумусности и уровня трофии, которые для достижения поставленных целей были укрупнены до 31 варианта путем объединения редко встречающихся классов высокощелочностных высокогумусных вод и кислых низкогумусных. Некоторые из выделенных классов, такие как высокощелочностные, слабощелочные мезополигумусные или низкощелочностные кислые ультраолигогумусные, ввиду их специфичности в имеющейся базе данных представлены не были. Поэтому итоговый список геохимических классов содержал 24 их комбинации.

Основным критерием отбора озер для включения в программу исследований было то, что водный объект должен наиболее точно характеризовать каждый из геохимических классов. Для выполнения этого требования был разработан следующий интегральный критерий оценки. На первом этапе проводилось ранжирование озер путем определения расстояния, характеризующего отдаление каждого озера от реперной точки класса, к которому оно отнесено на двумерной координатной плоскости классифицируемых параметров: $pH-Alk$, $Hum-Fe_{общ}$, класс гумусности – $P_{общ}$, для каждого из геохимических типов вод соответственно:

щелочности, гумусности и уровня трофии. Далее была проведена нормировка этого расстояния на его максимальное значение в каждом классе для получения возможности сравнивать эти показатели. В качестве основного критерия для включения водных объектов в программу исследования было выбрано среднее арифметическое нормированных расстояний для всех трех геохимических классов. Озера, у которых этот показатель был минимальным, отбирались для дальнейшей работы. Для каждого укрупненного класса было отобрано от одного до четырех озер. На этом этапе список состоял из 45 водных объектов.

С учетом разработанных требований выбрано 23 озера, максимально отличающихся по щелочности, гумусности и уровню трофии. На них был проведен отбор проб в летний период 2011 г. Для сезонных исследований в 2012 г., в связи со значительным увеличением числа проб, список водных объектов был сокращен до восьми. Для сохранения полноты выборки при отборе этих водных объектов использовались данные химического анализа проб воды, полученные летом 2011 г. Водные объекты, на которых проводились сезонные измерения, вошли в модельную группу озер, а водоемы, где пробы отбирались только в летний период, – в тестовую. Позже тестовая группа была дополнена еще двумя водными объектами, отбор проб на которых проводился в тот же период. Данные по гумусности воды обследованных озер приведены в таблицах 1 и 2. Все исследованные озера (рис. 1) и их водосборные бассейны расположены в центральной части Карелии, в районе прямоугольной формы, имеющей протяженность с севера на юг 200 км, с запада на восток 150 км и координаты центра $62^{\circ}07'23''$ с. ш., $33^{\circ}29'27''$ в. д.

Основным источником данных о строении водосборной территории являлась цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная методом дистанционного зондирования Земли с разрешением 90 м [USGS..., 2015], существенно

Таблица 2. Основные характеристики водосборной территории и гумусность группы тестовых водных объектов

Название озера	Кадастровый №	Средняя глубина, м	S_{wh} , км ²	S_{mash} , км ²	S_{wat} , км ²	Hum
Лугляярви	1660	1,5	142	18	15	34
Ягляярви	1661	3	95	12	11	32
Иля-Кялькянярви	1665	1,5	18	3	2	54
Кивач	1700	1,7	85	11	7	52
Палват	1704	1	106	15	8	54
Н. Ротчозеро	1721	2,5	25	5	4	33
Кутиж-озеро	1735	2	124	20	6	98
Мунозеро	1741	14,4	63	5	17	4
Сандал	1831	9,7	6779	995	948	21
Габозеро	1833	1,5	12	5	3	21
Чучъярви	-	4	7	1	1	7
Леликозеро	-	2	7	0	2	6
Коверъярви	-	3	9	1	2	34
Падмозеро	1859	4	101	17	12	16
Салонъярви	1639	3,9	1838	291	182	37
Валгомозеро	1863	8,8	13	0	4	5
Лижемское	1730	6,8	14	0,1	5	9

Примечание. S_{wh} – площадь водосборной территории, S_{mash} – площадь всех болот на водосборной территории, S_{wat} – площадь всех водных объектов на водосборе.

дополненная и доработанная [Ferranti, 2014], а также растровые топографические карты местности масштаба 1:100 000 и векторные карты, оцифрованные с топографических масштаба 1:200 000. Обработка картографического материала проводилась с помощью ГИС ESRI ArcGIS с пакетом Spatial Analysis, что позволило установить такие морфометрические характеристики водосбора, как его площадь и средний уклон (табл. 2, 3). Верификация контуров водосборных бассейнов проводилась на основе топографической карты масштаба 1:100 000. Площадь, занимаемая болотами и озерами на каждом из водосборных бассейнов, была определена с использованием векторных слоев, оцифрованных с карты масштаба 1:200 000.

Результаты и обсуждение

Большинство исследователей, занимавшихся вопросами влияния водосборной территории на содержание органического вещества в воде, отталкивались от предположения, что основной вклад в содержание аллохтонного органического вещества оказывают болота, сток которых отличается высокими значениями ЦВ и ПО и, соответственно, гумусностью. Однако по нашим данным значимой корреляции между коэффициентом заболоченности водосбора и гумусностью не наблюдалось ($R^2 = 0,21$). В связи с этим было выполнено отступление от общепринятого представления и проведен

поиск корреляционных зависимостей для других факторов, которые могли бы повлиять на гумусность воды. В частности, рассматривались такие характеристики, как средний уклон водосбора, средний уклон его негоризонтальной поверхности (водосборной территории за вычетом площадей болот и озер), отношение площади всех болот на водосборе к площади всех озер и к объему воды в исследованных озерах (на основании расчетных данных о площади и справочных данных о средней глубине), а также их различные комбинации. Большинство из них не показали значимых корреляций.

Наибольший коэффициент корреляции ($R^2 = 0,83$) был получен для следующей комбинации характеристик водосбора:

$$S_f = \frac{S_{wat}}{S_{wh} - S_{wat} - S_{mash}},$$

где S_{wat} – площадь всех водных объектов на водосборе, S_{wh} – площадь водосборной территории, S_{mash} – площадь всех болот на водосборной территории. Если внимательно рассмотреть данную формулу и учесть, что площадь поселений и сельхозугодий на рассматриваемых водосборах пренебрежимо мала, можно принять, что знаменатель является не чем иным, как площадью территории водосбора, покрытой лесом. Таким образом, коэффициент S_f будет выражать отношение площади водных объектов, находящихся на водосборе рассматриваемого озера, к площади лесов. Как видно

Таблица 3. Основные характеристики водосборной территории группы модельных водных объектов

Название озера	Средняя глубина	Площадь водосбора, км ²	Площадь болот, км ²	Площадь озер, км ²
Салонъярви	3,9	1838	291	182
Вегарус	4,4	160	32	17
Крошнозеро	5,7	191	4	25
Святозеро	6,8	51	0,7	13
Урозеро	12	21	0,8	14
Урос	2,9	7	0,4	4
Вендюрское	6,1	93	14	23
Яндомозеро	4,3	113	15	33

из рисунка 2, зависимость гумусности от показателя S_f может быть хорошо аппроксимирована степенной зависимостью с показателем степени $-0,794$.

Учитывая это, можно предположить, что болота выполняют лишь роль аккумуляторов органического вещества, в то время как его основным источником являются участки водосбора, покрытые лесом. Данное предположение выглядит логичным и с точки зрения общей биологической продуктивности болот и лесов – для последних она на порядок больше. Вместе с тем малая площадь озер на водосборе способствует быстрому выносу OB с его территории, в то время как на водосборах

с большой озерностью происходит его частичная ассимиляция.

Полученная зависимость была проверена на группе модельных водных объектов. Результаты расчета приведены в таблице 4. Как видно из таблицы, наибольшее отклонение расчетного показателя гумусности от наблюдаемого составило около 25 ед. для высокогумусного озера Кутиж-озеро, в то время как относительная погрешность была наибольшей для низкогумусных водных объектов: для них расчетные значения превышали наблюдаемые максимум в 2,5 раза. Вместе с тем дисперсия в разности прогнозируемых и измеренных значений гумусности составила 10 единиц, что можно считать хорошим

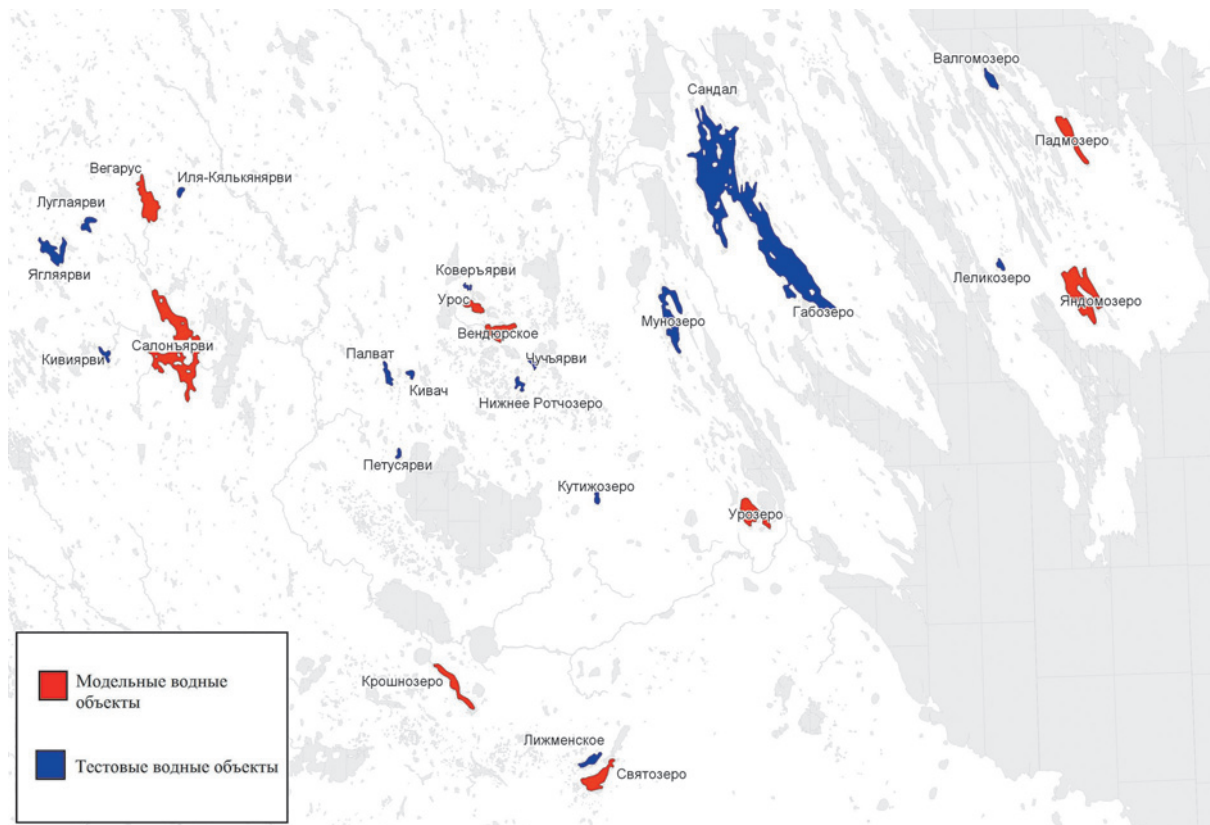


Рис. 1. Расположение исследованных озер

Таблица 4. Сравнение реальных значений гумусности воды с расчетными для тестовой группы озер

Название озера	Sf	Hum расч.	Hum набл.	Абсолютное отклонение Hum, ед.	Относительное отклонение Hum, %
Салонъярви	0,13	38	37	-1	1
Яглярви	0,16	32	31	-1	3
Палват	0,09	51	54	+3	6
Кивач	0,10	48	52	+4	8
Лугларви	0,13	38	34	-4	9
Иля-Кялякянярви	0,12	41	54	+13	24
Кутиж-озеро	0,06	72	98	+26	26
Н. Ротчозеро	0,23	24	33	+9	27
Коверъярви	0,23	24	34	+10	28
Сандал	0,20	28	21	-7	34
Крошнозеро	0,15	34	24	-10	41
Лижемское	0,49	13	9	-4	57
Габозеро	0,85	9	21	+12	58
Падмозеро	0,16	33	16	-17	110
Чучьярви	0,30	20	7	-13	175
Леликозеро	0,30	20	6	-14	207
Валгомозеро	0,47	14	5	-9	209
Мунозеро	0,42	15	4	-11	248

результатом. Также необходимо учесть, что данная зависимость получена для сезонных наблюдений и отображает среднее значение гумусности за сезон, в то время как на группе тестовых озер отбор проб осуществлялся только в летний гидрологический сезон, в который, как правило, содержание растворенного органического вещества в воде несколько ниже. Доверительный интервал прогноза гумусности воды при вероятности 0,95 находится в пределах $D_{Hum} = \pm 6$, при этом доверительный интервал при непосредственном определении гумусности с учетом сезонного ее колебания составляет $D_{Hum} = \pm 3$ ед.

(при вероятности 0,95, вычислено для группы модельных объектов).

Таким образом, можно заключить, что предложенная нами модель работает и может быть применена при планировании экспедиций, рекогносцировочных и других исследований, где полученная величина погрешности является допустимой.

Выводы

Проведенный анализ гумусности озер Карелии и характеристик их водосборных

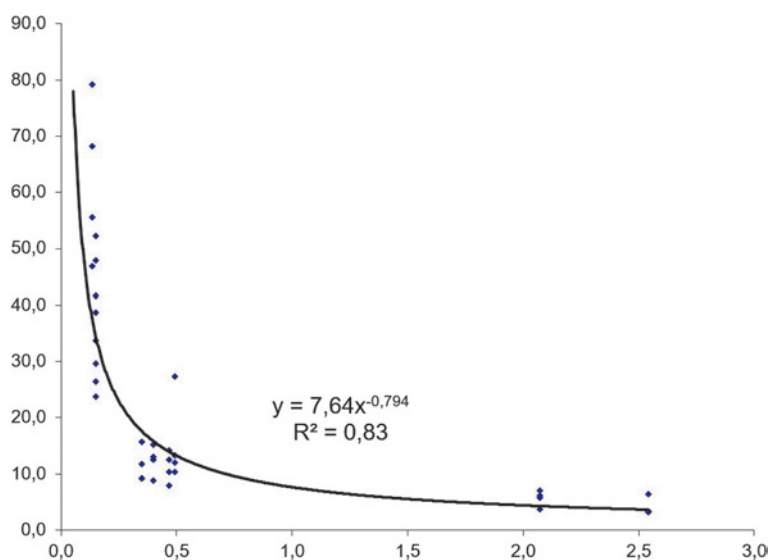


Рис. 2. Зависимость гумусности воды (Hum, ед.) от коэффициента Sf для модельной группы озер

бассейнов с использованием ГИС показал отсутствие ее связи с заболоченностью водосборов ($R^2=0,21$), но выявил значимую экспоненциальную зависимость ($R^2=0,83$) гумусности от отношения площадей всех водных объектов на водосборе к площади лесов. Такую закономерность можно объяснить тем, что ОВ преимущественно поступает с территорий, покрытых лесом, а в водных объектах происходит его частичная ассимиляция.

Установленная регрессионная зависимость была проверена на группе модельных водных объектов. Расхождение между спрогнозированными значениями и результатами прямых измерений гумусности в среднем не превышало 6 ед.

Для детального выяснения влияния леса на гумусность воды требуется проведение дальнейших исследований на большей выборке данных.

Автор благодарит сотрудников лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС Карельского научного центра РАН, принимавших участие в полевых выездах, обработке проб воды и формировании базы данных.

Литература

Зобков М. Б. Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической

информации и оценка состояния водных объектов (АИС «ОГХИ»». А. с. РФ на программу для ЭВМ № 2010612351 // Бюл. РУ ОБПБТ, 2010. № 2 (71). С. 563.

Зобков М. Б. Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.35. СПб., 2012. С. 68.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–593. doi: 10.1134/S0097807813060067

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук: 25.00.36. М., 2006. 481 с.

Andersson J. O., Nyberg L. Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams // *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22, no. 12. P. 1965–1975. doi: 10.1002/hyp. 6779

Andersson J. O., Nyberg L. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 13, no. 4. P. 537–549. doi: 10.5194/hess-13-537-2009

Ferranti J. Viewfinder panoramas. 2014: Digital elevations data. [Электронный ресурс]. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (дата обращения 01.02.2015).

USGS STRM DEM. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://srtm.usgs.gov/> (дата обращения 01.02.2015).

Поступила в редакцию 11.02.2016

References

Zobkov M. B. Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema "Obrabotka gidrohimicheskoj informacii i ocenka sostojanija vodnyh ob'ektov (AIS "OGHI)". A. s. RF na programmu dlja JeVM № 2010612351 [PC Automatic information system *Hydrochemical data processing and water objects condition assessment* (AIS OGHI). RF software certificate of authorship No. 2010612351]. *Bjul. RU OBПBТ* [Official Bulletin Software Programs. Data Bases. *Topology of Integrated Schemes* (OBПBТ)]. 2010. No. 2 (71). P. 563.

Zobkov M. B. Metody obrabotki geoinformacionnyh dannyh sostojanija vodnyh ob'ektov [Methods of geoinformational data processing of water objects]: Summary of PhD (Cand. of Tech.) thesis: 25.00.35. St. Petersburg, 2012. P. 68.

Lozovik P. A. Geochemical classification of surface waters in a humid zone based on their acid-base equilibrium. *Water Resources*. 2013. Vol. 40, no. 6. P. 631–639. doi: 10.1134/S0097807813060067

Lozovik P. A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstvu [Hydrogeochemical

criteria of surface waters in a humid zone and their tolerance to human impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis: 25.00.36. Moscow. 2006. 481 p.

Andersson J. O., Nyberg L. Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams. *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22, no. 12. P. 1965–1975. doi: 10.1002/hyp. 6779

Andersson J. O., Nyberg L. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 13, no. 4. P. 537–549. doi: 10.5194/hess-13-537-2009

Ferranti J. Viewfinder panoramas: Digital elevations data. 2014. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (accessed: 01.02.2015).

USGS STRM DEM. 2015. URL: <http://nationalmap.gov/elevation.html> (accessed: 01.02.2015).

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Зобков Михаил Борисович
научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: duet@onego.ru

CONTRIBUTOR:

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

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) публикует 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

Keywords: *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 vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

В транслитерированном списке литературы:

Viktorov G. A. 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'shому kursu po bibliografii: materialy i zametki*, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

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

Yu. V. Manilyuk, L. V. Cherkesov. INVESTIGATION OF SEICHES AND SEICHELIKE OSCILLATIONS IN THE MODEL BASIN, APPROXIMATING THE LADOGA LAKE	3
S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. Yu. Terzhevnik. VERTICAL THERMAL STRUCTURE AND HEAT EXCHANGE IN ICE COVERED LAKE	13

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

P. A. Lozovik, N. E. Galakhina. CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE KENTI RIVER SYSTEM WATER UNDER HUMAN IMPACT	21
N. I. Palshin, G. E. Zdorovenova, T. V. Efremova, R. E. Zdorovenov, G. G. Gavrilenko, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, A. Yu. Terzhevnik. ABSORPTION OF DISSOLVED OXYGEN BY THE UPPER LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS IN A SMALL LAKE DURING LATE WINTER	36
O. M. Labuzova, T. V. Noskova, M. S. Lysenko, E. G. Ilyina, T. S. Papina. ESTIMATION OF INFLOW OF PETROLEUM HYDROCARBONS FROM THE CITY OF BARNAUL TO NATURAL WATERCOURSES	48

HYDROBIOLOGY

E. S. Grishantseva, A. Yu. Bychkov, S. A. Shurupova, L. P. Fedorova. BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF RARE EARTH ELEMENTS ACCUMULATION BY MACROPHYTES OF THE IVAN'KOVSKOYE RESERVOIR	55
---	----

PALEOLIMNOLOGY

E. I. Ignatov, E. I. Borshchenko, A. L. Zagoskin, I. V. Zemlyanov, A. Yu. Sanin, P. N. Terskiy, M. O. Fathi. CONNECTION BETWEEN THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF LAKE ONEGO REGION, ITS TOPOGRAPHIC EVOLUTION AND THE DYNAMICS OF THE LAKE SHORES	65
--	----

RESEARCH METHODS

A. A. Korosov, D. V. Pozdnyakov, R. Shuchman, M. Sayers, R. Sawtell, A. V. Moiseev. BIO-OPTICAL RETRIEVAL ALGORITHM FOR THE OPTICALLY SHALLOW WATERS OF LAKE MICHIGAN. I. MODEL DESCRIPTION AND SENSITIVITY/ROBUSTNESS ASSESSMENT	79
V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. MODELS OF LAKE LADOGA BASED ON THREE-DIMENSIONAL CELLULAR AUTOMATA	93
M. B. Zobkov. PREDICTING THE HUMUS CONTENT OF NATURAL WATERS THROUGH GIS MODELLING	103

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	111
--------------------------------	-----

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 3, 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 18.03.2017. Дата выхода 31.03.2017. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,5. Усл. печ. л. 13,9.
Тираж 120 экз. Заказ 415. Цена свободная

Учредитель и 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