

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 4, 2020

Серия ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2020

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

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии «ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ»

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

Издается с января 2009 г.

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

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

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

No. 4, 2020

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

Petrozavodsk
2020

Editor-in-Chief

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

Editorial Council

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

Editorial Board of the LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

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

Published since January 2009

Monthly

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
Tel. (8142)762018; fax (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

© Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (KarRC RAS), 2020
© Northern Water Problems Institute of KarRC RAS, 2020

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.461.2 (262.81)

УРОВЕНЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ КАК ИНДИКАТОР КРУПНОМАСШТАБНОГО ВЛАГООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ОКЕАН – АТМОСФЕРА – СУША»

В. Н. Малинин, С. М. Гордеева

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается вся цепочка причинно-следственных связей в системе «Северная Атлантика – атмосфера – бассейн Волги – уровень Каспия». Ее составной частью является гидрологическая система «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном. В результате ее анализа показано, что изменения объема вод моря описываются комплексом разных по природе гидрологических и метеорологических факторов, имеющих различную пространственно-временную изменчивость и определяемых с существенно неодинаковой точностью. Основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость объема вод моря, а следовательно, и приращений уровня Каспия, является годовой сток Волги. Изменчивость стока Волги полностью контролируется осадками в стокоформирующей зоне бассейна. В свою очередь, формирование межгодовых колебаний осадков в значительной степени определяется притоком (оттоком) вертикально интегрированного горизонтального потока водяного пара через боковые границы стокоформирующей зоны бассейна Волги. Показано, что зональный перенос водяного пара с акватории Северной Атлантики является определяющим фактором межгодовой изменчивости осадков в бассейне Волги как в зимний, так и в летний периоды года. Установлено, что в результате активизации циклонической деятельности в Северной Атлантике, особенно в Норвежском море, обусловленной процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы, происходит повышение испарения, усиление зонального переноса водяного пара в Европу, а затем в бассейн Волги. Вследствие этого в стокоформирующей зоне бассейна выпадает большее количество осадков, происходит повышение годового стока Волги и уровня Каспия. Обратная картина отмечается при ослаблении циклонической активности в Северной Атлантике. Поэтому уровень Каспийского моря является интегральным индикатором крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша».

Ключевые слова: Каспийское море; морской уровень; водный баланс; сток Волги; осадки в бассейне Волги; перенос атмосферной влаги; Северная Атлантика; взаимодействие океана с атмосферой.

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva. CASPIAN SEA LEVEL AS AN INDICATOR OF LARGE-SCALE MOISTURE CYCLING IN THE OCEAN-ATMOSPHERE-LAND SYSTEM

The article discusses the entire causal chain in the North Atlantic – atmosphere –Volga basin – Caspian Sea level system. Its component part is the “Caspian Sea” hydrological system, interpreted as the sea itself, its drainage basin, and the atmosphere above the sea and the basin. Its analysis has demonstrated that changes in the sea water volume are modeled by a set of hydrological and meteorological factors of different nature, with different spatio-temporal variability, and determined at significantly different accuracies. The main factor for the interannual variation of the sea water volume, and hence the increment of the Caspian level, is the annual runoff via the Volga. The Volga streamflow variation is fully controlled by precipitation in the drainage zone of the catchment. In turn, interannual precipitation fluctuations are largely defined by the inflow (outflow) of a vertically integrated horizontal flow of water vapor across the lateral boundaries of the runoff-producing zone of the Volga basin. The zonal transfer of water vapor from the North Atlantic is shown to be the determinant in the among-year variation of precipitation in the Volga basin both in winter and in summer. It has been established that evaporation is growing and the zonal transfer of water vapor to Europe and then to the Volga basin is being intensified as a result of a higher cyclonic activity in the North Atlantic, the Norwegian Sea in particular, due to large-scale ocean-atmosphere interactions. Consequently, more rainfall occurs in the runoff-producing zone of the basin, annual streamflow of the Volga increases, and the Caspian level rises. The reverse is observed when cyclonic activity in the North Atlantic weakens. Therefore, the Caspian Sea level is an integral indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system.

Key words: the Caspian Sea; sea level; water balance; Volga streamflow; precipitation in the Volga drainage basin; atmospheric moisture transfer; North Atlantic; ocean-atmosphere interaction.

Введение

Экономическое значение Каспийского моря для населения прибрежных государств трудно переоценить. Кроме того, Каспий – уникальный водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому многообразию флоры и фауны. Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне моря связано с колебаниями его уровня. Негативное воздействие изменения уровня отражается на рациональном использовании природного потенциала, в частности, земельных, рыбных, рекреационных ресурсов, а также ресурсов нефти и газа. Поэтому изучение причин межгодовых колебаний и особенно долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря (УКМ) является чрезвычайно актуальной проблемой. Достаточно сказать, что в 1960–70-е годы гидрометеорологическая наука «проспала» длительный подъем уровня, начавшийся в конце 1970-х, вследствие чего экономический ущерб исчислялся в миллиардах долларов.

С тех пор прошло полвека, придумано несколько десятков методов сверхдолгосрочного прогноза УКМ, обзор которых содержится в [Водный..., 2016], но ни один из них не получил полного признания, и мы до сих пор не можем уверенно говорить о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. Это

связано с тем, что до настоящего времени «...отсутствует ясное понимание механизмов, управляющих изменчивостью уровня...» [Водный..., 2016]. На наш взгляд, принципиальной методологической ошибкой многих исследователей является то, что они пытаются построить прогностические модели непосредственно с годовыми значениями УКМ. В этом случае *теряется физический смысл полученных связей, ибо прогнозировать надо внутригодовые приращения уровня, которые входят в уравнение водного баланса моря и позволяют физически правильно рассчитывать сам УКМ.* Действительно, уровень замкнутого водоема в некоторый конечный момент времени t может быть выражен следующим образом:

$$h_t = h_0 + \int_0^t \frac{\partial h}{\partial t} dt, \quad (1)$$

где h_t и h_0 – соответственно уровень водоема в конечный и начальный момент времени, $\partial h/\partial t$ – частная производная уровня моря за период t .

В настоящее время надежными можно считать только методы прогноза характеристик уровня моря с годовой заблаговременностью. Это прогноз внутригодового хода УКМ, разработанный и в течение нескольких десятилетий успешно применяемый в Гидрометцентре [Абу-

зьяров, 2009 и др.], метод прогноза внутригодовых приращений уровня, разработанный в ГГО [Мещерская, Александрова, 1993] на основе метеорологических данных на водосборе Волги и Урала, и физико-статистический метод прогноза составляющих водного баланса и УКМ, предложенный в РГГМУ [Малинин, 1994а], основанный на генетической концепции формирования изменчивости уровня. Цель данной работы – выявление генезиса межгодовых колебаний уровня моря, без знания которого невозможно успешно прогнозировать УКМ.

Генезис межгодовых колебаний уровня моря

Гидрологическая система «Каспийское море»

Как известно, уровню Каспия свойственны значительные межгодовые колебания, амплитуда которых может достигать нескольких метров. Из рис. 1 видно, что в XX столетии размах колебаний уровня моря составил 3,2 м, причем можно выделить три достаточно длительных стабильных периода, в течение которых изменения уровня оказываются сравнительно однородными. Первый период (1900–1929 гг.) характеризуется стоянием уровня, т. е. его колебания носят случайный характер относительно некоторого среднего положения. Второй (1930–1977 гг.) сопровождается почти монотонным падением уровня, причем в течение 1930–1938 гг. он понизился на 1,75 м. На-

конец, третий период, начавшийся в 1978 г., характеризуется интенсивным ростом уровня за 1978–1995 гг., когда он повысился на два метра. На фоне разнонаправленных колебаний УКМ в XX столетии отмечается его постепенное снижение с линейным трендом, равным –17 мм/год и описывающим 33 % дисперсии исходного ряда.

Однако колебания уровня в XX веке не относятся к числу выдающихся событий в истории Каспия. Полный размах колебаний уровня за последние 2000 лет, по данным палеоклиматических реконструкций [Варущенко и др., 1987], мог составить 12 м, при этом его наименьшая отметка, согласно балтийской системе высот, отмечалась в середине V в. (–34,5 м), а наивысшая – в начале нашей эры (–22,5 м).

Причины столь значительных колебаний подробно обсуждались в монографии [Малинин, 1994а]. Для этого было введено понятие гидрологической системы «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном. Данную систему для годовых значений параметров можно описать соответствующими уравнениями водного баланса, складывая которые, получим:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\oint_{Lc} F_n dL - \frac{\partial S_0}{\partial t} - \frac{\partial W_{0m}}{\partial t}. \quad (2)$$

Левый член уравнения (2) характеризует внутригодовые изменения объема воды в Каспии. Первый член справа – результирующий приток (отток) вертикально интегрированного гори-

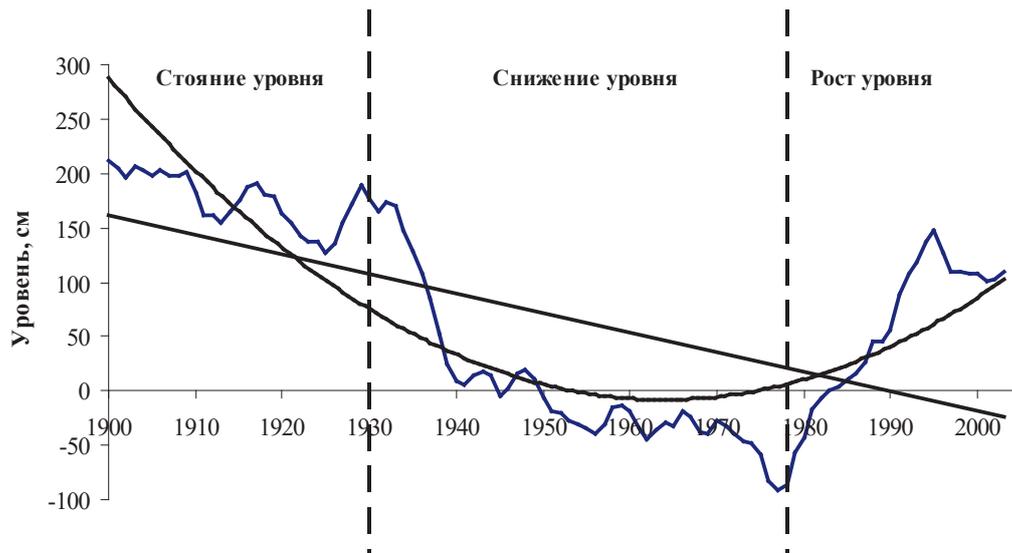


Рис. 1. Межгодовой ход уровня Каспийского моря по инструментальным наблюдениям (за ноль принята отметка –28 м БС)

Fig. 1. The interannual variation of the Caspian Sea level according to instrumental observations (–28 m of BS is taken as zero)

горизонтального потока водяного пара через боковые границы системы «Каспийское море плюс водосборный бассейн», второй член – внутригодовые изменения запасов влаги в почвенно-грунтовой толще этой системы, третий член – внутригодовые изменения влагосодержания атмосферы над этой системой, которыми можно пренебречь без существенной потери точности. На основании теоремы Остроградского – Гаусса первый член справа при его делении на площадь под контурным интегралом соответствует дивергенции вертикально интегрированного горизонтального полного потока водяного пара ($\text{div}\vec{F}$). Итак, *изменения объема вод моря описываются комплексом разных по природе гидрологических и метеорологических факторов, имеющих различную пространственно-временную изменчивость и определяемых с существенно неодинаковой точностью.*

Наземная ветвь гидрологической системы

Внутригодовые изменения объема воды в Каспии, определяемые через уравнение водного баланса моря, функционально связаны с внутригодовыми приращениями его уровня, т. е. $\Delta h = \Delta V/A$, где A – площадь моря. Тогда в соответствии с уравнением водного баланса моря имеем:

$$\Delta h = A^{-1} (Q_6 + U_6 - Q_{\text{КБГ}} + P_{\text{М}} - E_{\text{М}}), \quad (3)$$

где Q_6 – приток речных вод, U_6 – приток подземных вод, $Q_{\text{КБГ}}$ – отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол, $P_{\text{М}}$ – осадки на акваторию, $E_{\text{М}}$ – испарение с акватории моря. В данном уравнении

не учитываются стерические колебания уровня, а также водообмен через дно моря. Так как компоненты уравнения (3) непосредственно влияют на уровень моря, то они являются первичными (внутренними) уровнеобразующими факторами. В свою очередь каждая из них зависит от множества других факторов, которые опосредованно воздействуют на морской уровень и, следовательно, их можно рассматривать как вторичные (внешние) уровнеобразующие факторы.

Принципиальная особенность данного уравнения состоит в том, что формирование внутригодовых приращений уровня моря происходит двумя совершенно разными путями. С одной стороны, они зависят от процессов влагообмена через поверхность моря, а с другой – от зоны формирования стока Волги, находящейся за тысячи километров от самого моря в совершенно иных климатических условиях. Дело в том, что U_6 и $Q_{\text{КБГ}}$ дают значительно меньший вклад в приращения уровня, а величина Q_6 практически полностью зависит от стока Волги (Q_6), который составляет около 80 % от суммарного притока и примерно на 80 % определяет его дисперсию. При этом сам сток Волги формируется преимущественно в лесной зоне европейской части России.

На рис. 2 представлен график зависимости межгодовых колебаний внутригодовых изменений объема моря ($\text{км}^3/\text{год}$) от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г. Нетрудно видеть, что зависимость между этими переменными носит линейный характер и с помощью МНК аппроксимирована

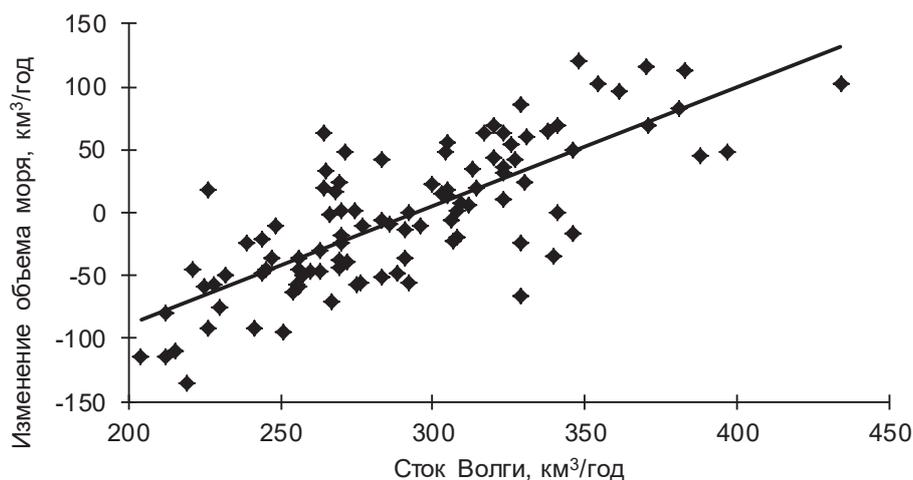


Рис. 2. Диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря ($\text{км}^3/\text{год}$) от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г.

Fig. 2. Ratio of intra-annual changes in the Caspian Sea volume (km^3/year) to the annual Volga runoff in Samara (km^3/year) for the period of 1890–1990

уравнением регрессии: $\Delta V = -246,7 + 0,0323Q_b$. Коэффициент детерминации данного уравнения составляет $R^2 = 0,64$, а среднеквадратическая ошибка – $34,6 \text{ км}^3/\text{год}$, или $2,4 \%$ от стандартного отклонения годового стока Волги. Отсюда видно, что примерно две трети межгодовой изменчивости приращений уровня обусловлены притоком речных вод, сформированным в лесной зоне бассейна Волги. Именно здесь за счет межгодовой изменчивости увлажнения поверхности суши формируется генетический сигнал, который затем как сток Волги поступает в море и в значительной степени влияет на межгодовые колебания уровня. Важно и то, что ряды Q_b и Δh , обладающие совершенно различной физической природой, имеют очень близкую спектральную структуру межгодовой изменчивости, что также подтверждает генетическую обусловленность формирования Δh от Q_b . По-иному обстоит дело с эффективным испарением, т. е. с разностью испарение минус осадки над морем, которое хотя и дает определенный вклад (около 30%) в изменчивость приращений уровня, однако этот вклад в основном сконцентрирован в области белого шума [Малинин, 2009].

Очень сложной является оценка второго члена справа в уравнении (2). Подробная оценка его выполнена в работе [Малинин, 1994а]. С учетом преобладающей роли стока Волги в приращениях уровня Каспия, можно записать:

$$\partial S_b / \partial t \approx \partial S_b / \partial t, \quad (4)$$

где $\partial S_b / \partial t$ отражает внутригодовые изменения запасов поверхностных и подземных вод в стокоформирующей части бассейна Волги, находящейся в условиях избыточного и достаточного увлажнения. Поскольку прямые оценки $\partial S_b / \partial t$ практически невозможны, то обратимся к уравнению водного баланса системы «атмосфера – литосфера» для бассейна Волги без учета влагосодержания атмосферы в следующем виде:

$$\partial S_b / \partial t = -\text{div} \bar{F} - Q_b. \quad (5)$$

В работе [Смирнов, Малинин, 1988] выполнена оценка значений $\text{div} \bar{F}$ и речного стока Волги у г. Самары за гидрологический год (октябрь–сентябрь) с учетом изменений запасов влаги в водохранилищах Волжско-Камского каскада и показано, что между ними отмечается хорошее соответствие, т. е. $\text{div} \bar{F} \approx Q_b$. Отсюда следует, что для площадей порядка 10^6 км^2 и периодов времени в гидрологический год величина $\partial S_b / \partial t$ является уже малой по сравнению с другими межгодовыми колебаниями компо-

нентов водного баланса. Понятно, что межгодовые колебания значений $\partial S_b / \partial t$ ощутимо зависят от локальных ландшафтных условий и на больших площадях могут быть весьма значительными. Однако при пространственном осреднении в результате их разнонаправленных колебаний суммарное значение $\partial S_b / \partial t$ уменьшается и становится малой величиной для площадей порядка 10^6 км^2 [Смирнов, Малинин, 1988].

Итак, можно сделать вывод, что *формирование межгодовых колебаний стока Волги, а следовательно, и приращений уровня Каспия в значительной степени определяется притоком (оттоком) вертикально интегрированного горизонтального потока водяного пара через боковые границы стокоформирующей зоны бассейна Волги.*

Есть основания полагать, что формирование стока Волги от начала половодья до начала следующего половодья практически полностью зависит от увлажнения в ее бассейне за два предшествующих года. В свою очередь, общее увлажнение представляет собой разность осадки минус испарение, причем межгодовая изменчивость осадков для сравнительно больших территорий значительно выше межгодовой изменчивости суммарного испарения [Малинин, 1994а; Малинин и др., 2014]. Исходя из этого, статистическая модель для годового стока Волги может быть записана в следующем виде:

$$Q_i = f(P_{(i-1)j}^x, P_{(i-1)j}^T, P_{(i-2)j}^x, P_{(i-2)j}^T), \quad (6)$$

где Q_i – календарный годовой сток реки; P_j^x , P_j^T – суммарные за холодный (октябрь–март) и теплый (апрель–сентябрь) периоды года осадки на j станции; i – номер текущего года; $i-1$, $i-2$ – номера двух предыдущих лет соответственно. Основное влияние на сток оказывает первый предшествующий год. Влияние второго года сказывается главным образом в аномальные по характеру увлажнения годы.

Эффективность прогностической модели (6) доказана в работе [Малинин, 1994а], в которой за период 1891–1990 гг. приведены результаты прогноза годового стока Волги по очень большому числу осадкомерных пунктов, усредненных для административных территорий (областей) на основе использования пошагового алгоритма множественной линейной регрессии. После 1991 года и резкого уменьшения наблюдательной сети использование осредненных осадков для административных областей стало невозможным. Поэтому были выполнены новые расчеты годового стока Волги по малому числу ($n = 30$) реперных осадкомерных станций в лесной зоне [Описание..., 2019]. Осадки брались отдельно в теплое и холодное полугодия

Статистические оценки годового стока р. Волги по зависимой (1983–2008 гг.) и независимой (2009–2013 гг.) выборке для всех деревьев решений [Malinin, Gordeeva, 2019]

Statistical assessment of the Volga River annual runoff for the dependent (1983–2008) and independent (2009–2013) samples for all decision trees [Malinin, Gordeeva, 2019]

Номер дерева Tree number	Число терминальных (нетерминальных) вершин Number of terminal (nonterminal) vertices	Коэффициент детерминации по зависимой выборке Determination coefficient for the dependent sample	Стандартная ошибка годового стока Волги по зависимой выборке, м ³ /с The standard error of the Volga River annual runoff for the dependent sample, m ³ /s	Стандартная ошибка годового стока Волги по независимой выборке, м ³ /с The standard error of the Volga River annual runoff for the independent sample, m ³ /s
1	7 (6)	0,89	378,3	982,4
2	6 (5)	0,90	367,9	876,6
3	5 (4)	0,88	412,2	876,6
4	4 (3)	0,79	536,0	845,6
5	3 (2)	0,65	695,9	554,6
6	2 (1)	0,39	923,9	740,1

за период 1981–2013 гг. В результате общее число предикторов, в соответствии с (6), составило $m = 120$. При этом зависимая выборка включала в себя 26, а независимая – 5 лет (2009–2013 гг.). Для оптимальной модели множественной линейной регрессии (МЛР), содержащей пять переменных, стандартная ошибка оценки стока по зависимой выборке составила 589 м³/с, а по независимым данным за 2009–2013 гг. она равна 605 м³/с.

Помимо модели МЛР использовался также метод деревьев решений (decision trees), описание которого дано в работах [Breiman et al., 1984; Bramer, 2007]. Отметим, что данный метод пока не получил распространения в гидрометеорологии [Гордеева, Малинин, 2016]. Моделирование годового стока р. Волги (г. Волгоград) выполнялось в пакете Statistica алгоритмом CART с априорными вероятностями, пропорциональными численности классов, и ценой одинаковой для всех классов ошибки классификации [Interactive...].

В результате расчетов получено, что полное дерево имеет шесть ветвлений [Malinin, Gordeeva, 2019]. Для полного дерева коэффициент детерминации между исходными и вычисленными значениями стока для зависимой выборки составляет $R^2 = 0,89$, стандартная ошибка стока равна 378 м³/с при стандартном отклонении речного стока 1207 м³/с. Отсюда видно, что алгоритм CART отсекает около 10 % дисперсии стока Волги, т. е. мелкомасштабную изменчивость. Однако для независимой выборки наилучшим является не полное дерево, а дерево 5 (табл.), которое содержит всего две вершины ветвления. Для него стандартная ошибка годового стока Волги составляет всего 554,6 м³/с, или 0,46 от величины стандартного отклонения стока.

Дерево 5 приводится на рис. 3. Нетрудно видеть, что оно имеет очень простой вид. На пер-

вом ветвлении разделителем выступают зимние осадки за предшествующий год в п. Кумыны. Если осадков выпадало < 254,6 мм, то в 15 случаях из 26 отмечался низкий сток Волги со средней величиной 7760,7 м³/с. Если их выпадало > 254,6 мм, то, наоборот, сток был высоким (среднее – 9257,3 м³/с). Очевидно, п. Кумыны можно рассматривать как важнейший индикатор оценки межгодовых колебаний стока Волги, так как он также является первым предиктором в регрессионной модели годового стока и самым чувствительным индикатором влияния переноса влаги с Северной Атлантики на осадки.

На втором ветвлении уточняется формирование 15 значений низкого стока Волги за счет летних осадков в п. Рыбинск за предыдущий год. Если осадков выпадало мало (< 455,2 мм), то отмечалось 10 значений аномально низкого стока Волги (среднее – 7195 м³/с), если осадков выпадало > 455,2 мм, то величина стока была близка к норме (среднее – 8892 м³/с). Уже двух указанных переменных оказалось достаточно, чтобы с высокой точностью по заданной выборке осуществлять долгосрочный прогноз годового стока Волги у г. Волгограда.

Сравнение результатов сопоставления фактических и вычисленных значений стока р. Волги по модели МЛР для пяти переменных и по дереву решений для двух ветвлений свидетельствует, что модель по деревьям оказывается заметно эффективнее. Дополнительным преимуществом данного метода является визуализация получаемых результатов и более понятная их интерпретация.

Итак, *осадки в стокоформирующей зоне бассейна Волги контролируют изменчивость годового стока Волги и внутригодовых приращений уровня Каспия*. В этом суть наземной ветви гидрологической системы «Каспийское море».

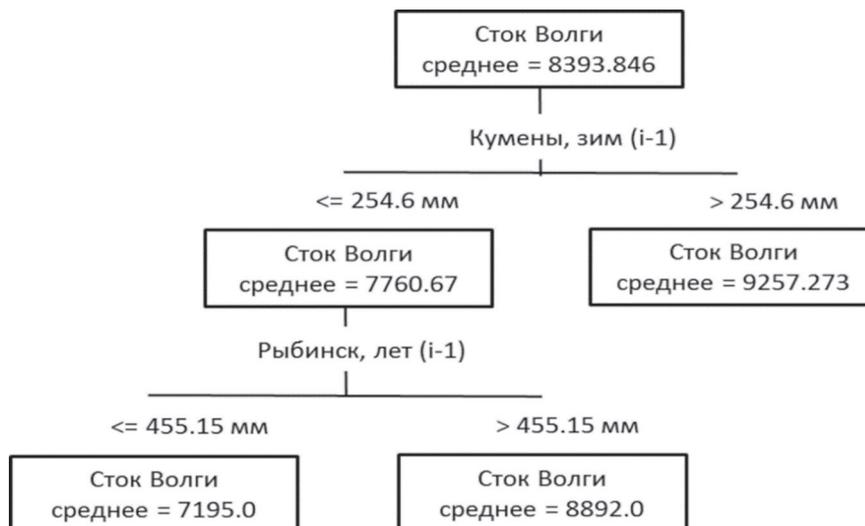


Рис. 3. Дерево решений номер 5, описывающее формирование годового стока (м³/с) Волги (г. Волгоград) в i -год в зависимости от зимних и летних осадков (мм/год) в $i - 1$ и $i - 2$ годы на метеорологических станциях, расположенных на территории бассейна, за период 1983–2008 гг.

Fig. 3. Decision tree number 5 describing the formation of the Volga annual runoff (in Volgograd) for i -year depending on winter and summer precipitation (mm/year) in $i - 1$ and $i - 2$ years at meteorological stations on the basin for the period of 1983–2008. The Volga runoff in m³/s

Атмосферная ветвь гидрологической системы

Атмосферная ветвь данной системы – это горизонтальный перенос атмосферного водяного пара и его влияние на формирование осадков на территории бассейна. Запишем уравнение водного баланса атмосферы над бассейном Волги в виде

$$\partial W_B / \partial t + \text{div} \bar{F} = E_B - P_B, \quad (7)$$

где W_B – интегральное влагосодержание атмосферы, осредненное над бассейном Волги, \bar{F} – вертикально интегрированный полный горизонтальный поток водяного пара, определяемый по аэрологическим данным обычно до верхней границы тропосферы, E_B , P_B – соответственно испарение и осадки, осредненные по территории бассейна. Как уже отмечалось, величиной $\partial W_B / \partial t$ обычно пренебрегают ввиду малости для годовых интервалов времени.

Результаты расчетов отдельных компонентов уравнения (7) показали [Смирнов, Малинин, 1988], что количество осадков, выпадающих в стокоформирующей зоне бассейна Волги, пропорционально интенсивности адвективного горизонтального переноса водяного пара, обусловленного процессами общей циркуляции атмосферы. Известно, что единственным источником выпадения осадков в бассейне Волги в холодный период года и основным в теплый период является атмосферный перенос водяного пара, обусловленный испарением

с акватории Северной Атлантики. И хотя атмосферная влага с Северной Атлантики может попадать с трех направлений (западное, южное, северное), преобладающий перенос является зональным. Поэтому был выбран меридиональный разрез по 5° в. д. от 40 до 70° с. ш., через который осуществляется основной внос атмосферной влаги на территорию Европы, в том числе на европейскую территорию России.

Для оценки вертикально интегрированных горизонтальных потоков водяного пара использовался архив NCEP – DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) [Kanamitsu et al., 2002]. Данный архив является продолжением 50-летнего проекта (с 1948 г. по настоящее время) NCEP-NCAR Reanalysis и охватывает спутниковый период с 1979 г. по настоящее время. Срочные 6-часовые аэрологические данные температуры воздуха, относительной влажности, скорости и направления ветра, геопотенциальной высоты представлены на стандартных изобарических поверхностях (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 гПа) в узлах $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ географической сетки. Данные архива Reanalysis-2 находятся в свободном доступе по адресу: http://apdr.c.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/NCEP.

Как известно, вертикально интегрированный полный зональный поток водяного пара может быть определен следующим образом:

$$F_x = \bar{F}_x + F'_x = g^{-1} \int_{P_k}^{P_0} \bar{q} \bar{u} dp + g^{-1} \int_{P_k}^{P_0} q' u' dp, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, q – удельная влажность, u – зональная компонента скорости ветра (чертой обозначено усреднение во времени, а штрих показывает пульсации характеристик), P_0 и P_k – атмосферное давление у земной поверхности и на такой высоте, где влажность становится пренебрежимо малой. В формуле (8) \bar{F}_x и F'_x представляют собой соответственно адвективный и вихревой зональные потоки водяного пара. Считается, что при временном осреднении 1 месяц адвективная компонента характеризует поток атмосферной влаги за счет средней во времени (общей) циркуляции, а вихревая – перенос влаги за счет макротурбулентности, обусловленный главным образом циклонами и антициклонами.

Если для оценки полного потока влаги F_x необходимы срочные (не менее двух раз в сутки) данные радиовеетрового зондирования, то адвективный перенос \bar{F}_x может быть рассчитан по среднемесячным данным о ветре и влажности. В связи с этим расчет полного потока, особенно за длительный период времени, представляет весьма сложную задачу и не всегда оказывается возможным по техническим причинам или из-за отсутствия необходимых данных [Малинин, 1994б].

Среднемесячные потоки влаги (полные, адвективные, макротурбулентные) были рассчитаны по срочным (2 раза в сутки) данным для меридионального разреза по 5° в. д. через $2,5^\circ$ широты от 40 до 70° с. ш. за период 1980–2014 гг. [Malinin, Gordeeva, 2019]. Именно через этот разрез идет основной внос атмосферной влаги на территорию Европы, который можно рассматривать как *отражение результирующего влияния Северной Атлантики на процессы влагооборота атмосферы над Европой*. Макротурбулентный поток F'_x определялся как разность полного и адвективного потоков водяного пара. После этого вычислялись средние значения потоков влаги за холодное (октябрь–март) и теплое (апрель–сентябрь) полугодия, а также за год в целом. Вклад вихревого потока влаги в полный перенос в среднем за год максимален в зоне 45 – 55° с. ш. (до 11 %), причем для зимних условий его вклад увеличивается до 17 %.

Естественно, важным является вопрос оценки точности расчета потоков влаги. С этой целью для трех аэрологических станций: Ставангер (Норвегия, $58,87^\circ$ с. ш. $5,67^\circ$ в. д.), Леруик (Шетландские острова, $60,13^\circ$ с. ш. $1,185^\circ$ з. д.) и Валентия (юго-запад Англии, $51,93^\circ$ с. ш. $10,25^\circ$ з. д.) в работе [Малинин и др., 2015] были рассчитаны среднемесячные полные зональные потоки влаги за период 1980–2014 гг. и выполнено их сравнение с переносом влаги

для ближайших узлов сеточной области к этим станциям: 58° с. ш. 6° в. д.; 60° с. ш. $2,5^\circ$ з. д.; $52,5^\circ$ с. ш. 10° з. д. Оно показало очень высокое сходство, причем систематические и случайные расхождения оказались незначительными. Коэффициент детерминации, характеризующий объясненную дисперсию рассчитываемой переменной, меняется в пределах от $R^2 = 0,81$ (ст. Ставангер) до $R^2 = 0,94$ (ст. Валентия). Некоторые расхождения по ст. Ставангер вызваны влиянием на перенос влаги орографических эффектов подстилающей поверхности в районе этой станции. Отсюда следует, что для оценки потоков атмосферной влаги над океаном с высокой степенью надежности можно использовать архив Reanalysis-2.

Межгодовая изменчивость зонального переноса влаги через данный разрез рассмотрена в работе [Malinin, Gordeeva, 2019]. Максимальный поток водяного пара отмечается на широте $52,5^\circ$ с. ш. По направлению к югу он начинает уменьшаться под влиянием ослабления скорости ветра, а к северу – в связи с уменьшением влагосодержания атмосферы. Максимальная межгодовая изменчивость отмечается в северных широтах и уменьшается к южным широтам примерно в 2 раза. Были выявлены отрицательные значения линейных трендов в потоках влаги, которые проявляются в течение всего года. Однако все они оказались незначительными, что говорит о слабой тенденции к уменьшению переноса влаги на континент. Эти результаты не подтверждают рост эффективного испарения по данным большинства архивов реанализа на акватории Северной Атлантики, но полностью соответствуют результатам Reanalysis-2 [Malinin, Gordeeva, 2019].

Для оценки влияния зонального переноса влаги с акватории Северной Атлантики на межгодовую изменчивость осадков в бассейне Волги было выбрано 30 относительно равномерно расположенных станций, для которых был сформирован архив зимних (октябрь–март) и летних (апрель–сентябрь) осадков за период 1981–2013 гг. Для каждой из этих станций для холодного и теплого периода рассчитывались регрессионные модели с полным зональным потоком водяного пара в 13 точках на меридиональном разрезе 5° в. д. Всего было рассчитано 60 моделей МЛР. Это позволило построить карты пространственного распределения коэффициентов детерминации (рис. 4), которые показывают суммарный вклад потоков влаги в формирование межгодовой изменчивости осадков [Malinin, Gordeeva, 2019].

Из рис. 4 видно, что для преобладающей части стокоформирующей зоны бассейна этот

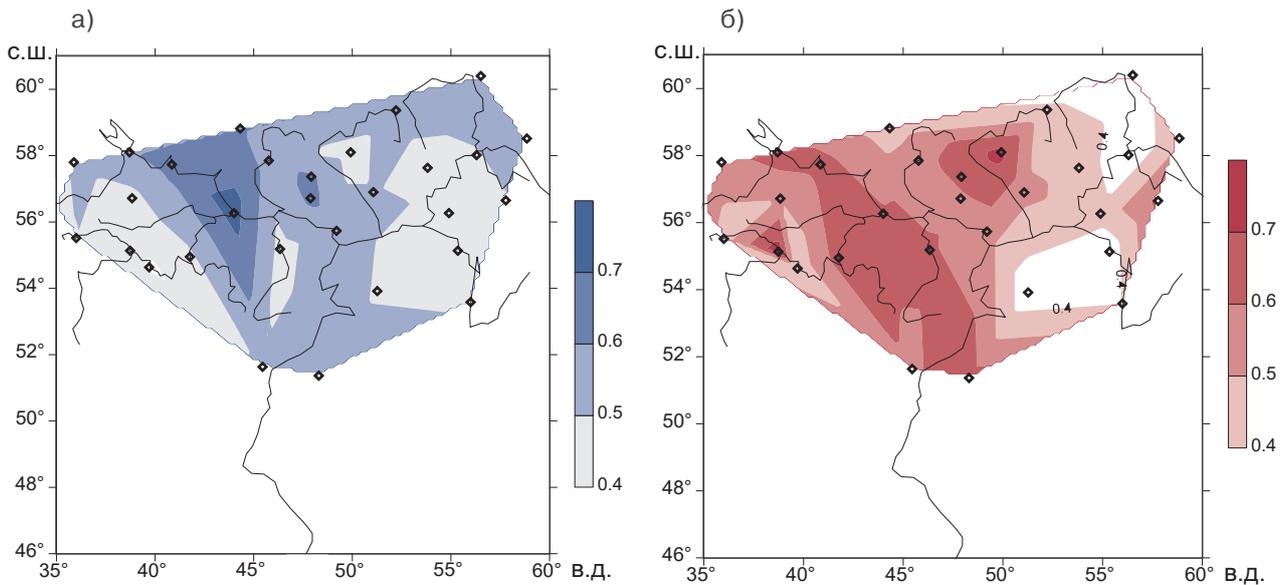


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов детерминации, показывающих суммарный вклад полных зональных потоков влаги в 13 точках на меридиональном разрезе 5° в. д. в формирование межгодовой изменчивости (а) зимних (октябрь–март) и (б) летних (апрель–сентябрь) осадков в стокоформирующей зоне бассейна Волги

Fig. 4. Spatial distribution of determination coefficients as sum contribution of the total zonal moisture flux at 13 points of the 5E meridional section to the formation of interannual variability of winter (October–March) (a) and summer (April–September) (b) precipitation in the Volga basin

вклад превышает 50 % как в холодный, так и в теплый период года. Максимальные значения R^2 зимой достигают 0,65–0,70 и отмечаются в левобережной части Волги до Чебоксар, а летом – на водосборе р. Вятка. Абсолютный максимум R^2 наблюдается зимой на ст. Нижний Новгород ($R^2 = 0,73$), а летом на станции Кумыны ($58^{\circ}06'$ с. ш. $49^{\circ}54'$ в. д.), расположенной на водосборе р. Вятка ($R^2 = 0,73$). Среднее значение для всех станций вклада потоков влаги в дисперсию осадков одинаково зимой и летом и составляет $R^2 = 0,53$. Это означает, что перенос влаги на меридиане 5° в. д. испытывает по мере движения на восток не очень заметную трансформацию, вследствие чего его влияние на изменчивость осадков в бассейне Волги остается внушительным.

Итак, зональный перенос водяного пара с акватории Северной Атлантики в значительной степени определяет межгодовую изменчивость осадков в бассейне Волги как в зимний, так и в летний периоды года.

Океаническая ветвь гидрологической системы

Атмосферный перенос влаги формируется под воздействием крупномасштабных процессов взаимодействия океана с атмосферой в Северной Атлантике. В 1994 году высказано

следующее предположение [Малинин, 1994а]: «...если вследствие крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике эффективное испарение оказывается выше нормы, то большее количество влаги будет переноситься на континент и, соответственно, большее количество осадков выпадает в бассейне Волги. Следовательно, происходит увеличение годового стока и наблюдается положительное приращение уровня моря. Обратная картина отмечается при ослаблении эффективного испарения в Северной Атлантике. Таким образом, именно изменчивость эффективного испарения является, очевидно, наиболее важным «уровнеобразующим» фактором...». В дальнейшем в монографии [Малинин и др., 2003] выполнена детализация процессов взаимодействия океана с атмосферой в Северной Атлантике, формирующих межгодовую изменчивость зонального переноса водяного пара. Выявлено, что при усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике, и прежде всего в области Исландской депрессии, увеличивается испарение и влагосодержание атмосферы и происходит понижение температуры поверхности воды. Одновременно с этим повышается зональная составляющая эффективной скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующая количество переносимого водяного пара

в системе средней циркуляции атмосферы и крупномасштабных синоптических вихрей. Наконец, при росте циклонической активности происходят углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность североатлантического колебания, которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Все это вместе взятое должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России. Естественно, при ослаблении циклонической и возрастании антициклонической активности картина будет меняться на противоположную. Это позволяет всю цепочку причинно-следственных связей формирования межгодовых колебаний УКМ представить в виде следующей концептуальной модели (рис. 5), из которой видно, что в конечном счете генезис межгодовых колебаний УКМ обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике.

Итак, приходим к выводу, что *уровень Каспия можно рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша».*

С учетом новых данных о зональном переносе влаги на меридиане 5° в. д. возможна опре-

деленная детализация влияния процессов в системе «океан – атмосфера» на изменчивость атмосферного потока водяного пара. С этой целью вначале рассмотрим закономерности межгодовых колебаний переноса влаги на меридиональном разрезе 5° в. д., для выявления которых использован метод главных компонент. Разложению подвергались три матрицы полного потока водяного пара (для обоих полугодий и за год в целом) размером 13×35. Вследствие высокой коррелированности потоков влаги получена высокая и почти одинаковая сходимость для всех трех разложений. Так, для холодного полугодия первые две главные компоненты, а для года в целом три главные компоненты, описывают 90 % дисперсии исходного поля [Malinin, Gordeeva, 2019].

Анализ собственных векторов разложения (нагрузок главных компонент), представляющих собой коэффициенты корреляции между исходными данными и соответствующей главной компонентой, свидетельствует об их четкой структурированности, которая заключается в том, что легко выделяются квазиоднородные зоны по характеру межгодовых колебаний переноса водяного пара. Например, в холодное полугодие в первом собственном векторе отмечается резко выраженная оппозиция между южной (40–42,5° с. ш.) и северной (57,5–70° с. ш.) зонами: усиление переноса в одной из них ведет к ослаблению в другой и наоборот (рис. 6). Второй собственный



Рис. 5. Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря

Fig. 5. Genetic model of interannual fluctuations formation of the Caspian Sea level

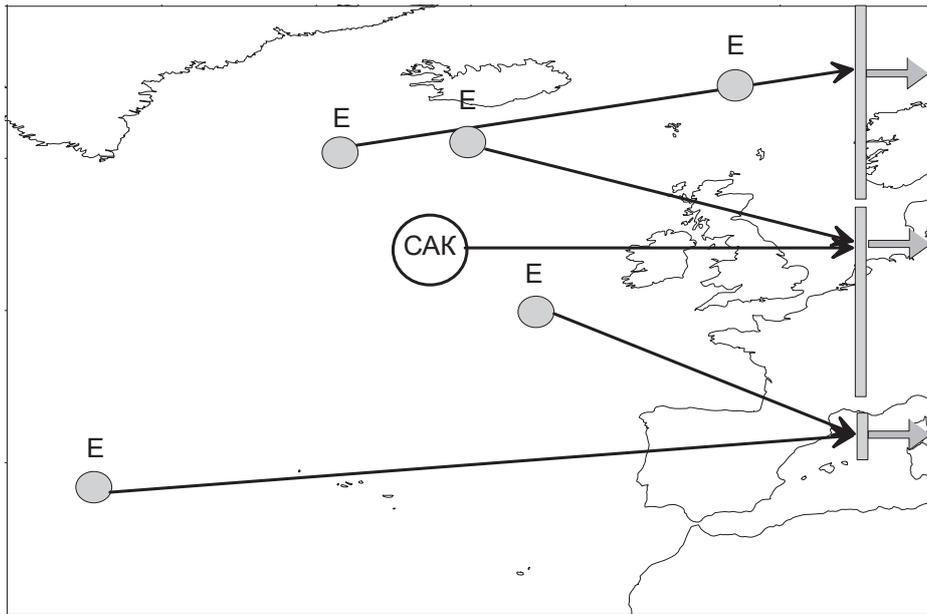


Рис. 6. Районирование вертикально интегрированных горизонтальных зональных потоков водяного пара на меридиональном разрезе 5° в. д. от 40° до 70° с. ш. для холодного полугодия (октябрь–март) 1980–2014 гг. Кружками показаны районы в океане, в которых испарение имеет наиболее высокую положительную корреляцию с переносом влаги на разрезе

Fig. 6. Zoning of vertically integrated horizontal zonal water vapor flows at the 5° meridional section from 40° to 70° N for the cold half-year (October–March) in 1980–2014. The circles indicate ocean areas where evaporation has the highest positive correlation with moisture transport across the section

вектор отражает буферную центральную зону ($45\text{--}55^\circ$ с. ш.). Отсюда следует, что северная зона представляет собой Норвежское море, южная – Средиземное море, а центральная – территорию Европы.

Два основных фактора, формирующих перенос влаги в Европу, – это *испарение с акватории океана и циркуляция атмосферы*. Интегральным индексом циркуляции может служить североатлантическое колебание (САК), интенсивность которого определяет геострофический зональный перенос воздушных масс с акватории Северной Атлантики в Европу. На рис. 7 представлено распределение коэффициентов корреляции между индексом САК (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>) и полным зональным потоком водяного пара для холодного (октябрь–март) и теплого (апрель–сентябрь) полугодий за 1980–2014 гг. на меридиональном разрезе 5° в. д. [Малинин и др., 2015]. Нетрудно видеть, что в холодный период значимая на уровне $\alpha = 0,05$ корреляция отмечается между $45\text{--}65^\circ$ с. ш., причем максимальная корреляция ($r = 0,60$) имеет место в зоне $52,5\text{--}55^\circ$ с. ш., где зональный перенос водяного пара в Европу

максимален. Отметим, что влияние САК на адвективный перенос (\bar{F}_x) несколько выше почти на всех широтах, а максимальная корреляция на широте 55° с. ш. составляет $r = 0,65$. Как и следовало ожидать, в теплый период года, когда САК выражен значительно слабее, его влияние на перенос влаги резко снижается. Значимая положительная корреляция отмечается лишь на широте 60° с. ш.

Значительное влияние САК на межгодовую изменчивость переноса влаги на разрезе 5° в. д. обусловлено характером зонального переноса водяного пара непосредственно над акваторией Северной Атлантики. В работе [Малинин и др., 2003] четко показано, что распределение поля зонального переноса влаги для холодного (октябрь–март) полугодия над Северной Атлантикой за период 1962–1988 гг. характеризуется ярко выраженным диполем, проявляющимся в противофазности колебаний потоков влаги между районами, находящимися под воздействием Исландского минимума (севернее 55° с. ш.) и Азорского максимума (южнее 40° с. ш.). Это соответствует оппозиции в межгодовых колебаниях переноса влаги в южной ($40\text{--}42,5^\circ$ с. ш.) и северной ($57,5\text{--}70^\circ$ с. ш.) частях меридионального разреза 5° в. д.

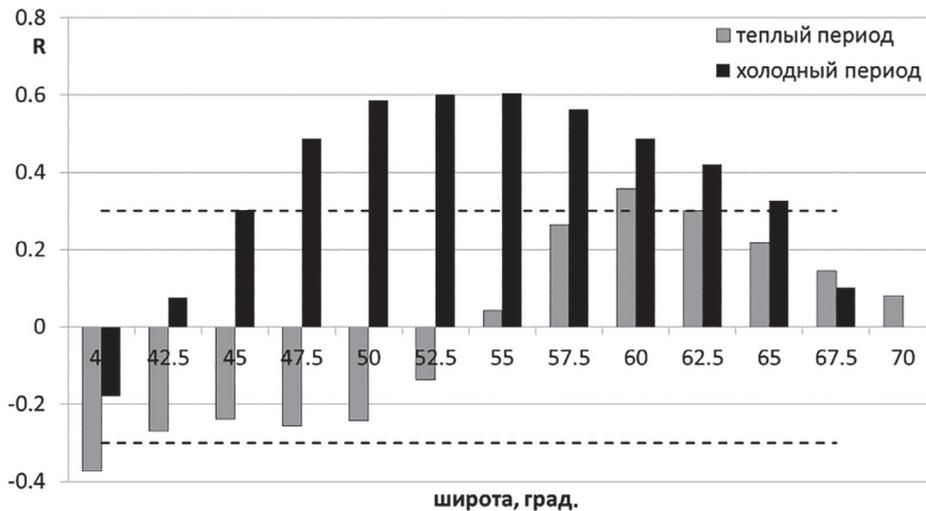


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между индексом САК и полным зональным потоком водяного пара для холодного (октябрь–март) и теплого (апрель–сентябрь) полугодий за 1980–2014 гг. на меридиональном разрезе 5° в. д. Штриховые линии – доверительные интервалы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [Малинин и др., 2015]

Fig. 7. Correlation coefficients between the NAO index and the total zonal water vapor flow for the cold (October–March) and warm (April–September) half-year in 1980–2014 at the 5E meridional section. The dashed lines are confidence intervals at $\alpha = 0.05$ significance level [Malinin et al., 2015]

Достаточно подробно межгодовая изменчивость испарения в Северной Атлантике по данным разных архивов рассматривается в статье [Malinin, Gordeeva, 2017]. Процедура оценки влияния испарения с акватории Северной Атлантики на перенос влаги на меридиональном разрезе 5° в. д. описана в работе [Malinin, Gordeeva, 2019]. С этой целью из архива Reanalysis-2 [Kanamitsu et al., 2002] были отобраны 5-градусные «квадраты» акватории Северной Атлантики между 30 и 70° с. ш. Суть процедуры состояла в том, что вначале были построены карты пространственного распределения коэффициентов корреляции между первыми тремя главными компонентами зонального переноса влаги для средних годовых условий и испарением, которые позволили выявить очаги значимой корреляции на акватории Северной Атлантики. Далее для каждой главной компоненты строились оптимальные модели множественной линейной регрессии с реперными квадратами. Выявлено 16 реперных квадратов испарения, по которым выполнено восстановление фактического поля годовых значений переноса влаги на разрезе 5° в. д. в 13 точках. Результаты такого восстановления приводятся на рис. 8. Нетрудно видеть, что, исключая крайний юг (южнее 45° с. ш.) и крайний север (севернее 67,5° с. ш.), горизонтальный перенос описывается с высокой точностью. Коэффициент детерминации, показывающий долю объяс-

ненной дисперсии годовых значений переноса влаги, составляет $R^2 = 0,65–0,79$. Отметим, что для холодного полугодия даже по 5 реперным квадратам испарения в Северной Атлантике (рис. 6) примерно с такой же точностью можно рассчитать значения F_x для Норвежского моря.

Естественно, возникает вопрос оценки точности выявленной цепочки причинно-следственных связей от уровня Каспийского моря до Северной Атлантики. С этой целью выполнен расчет дерева решений для внутригодовых приращений уровня моря в Баку за 1982–2009 гг. ($n = 28$) по матрице, состоящей из зонального потока водяного пара на меридиане 5° в. д. за холодное полугодие (октябрь–март) и теплое полугодие (апрель–сентябрь) прошлого года. Следовательно, в исходную матрицу входит 26 точек потоков влаги с апреля 1981 г.

На рис. 9 приводится дерево, состоящее из трех ветвлений. На первом ветвлении разделителем выступает зимний перенос влаги на широте 57,5° с. ш., максимальное значение которого (125 кг/м·с) отделяет экстремальное положительное приращение уровня (41 см, 1990 год) от остальной совокупности. На втором ветвлении разделителем служит поток влаги на широте 47,5° с. ш., который отделяет еще две значительные положительные аномалии приращений уровня со средним значе-

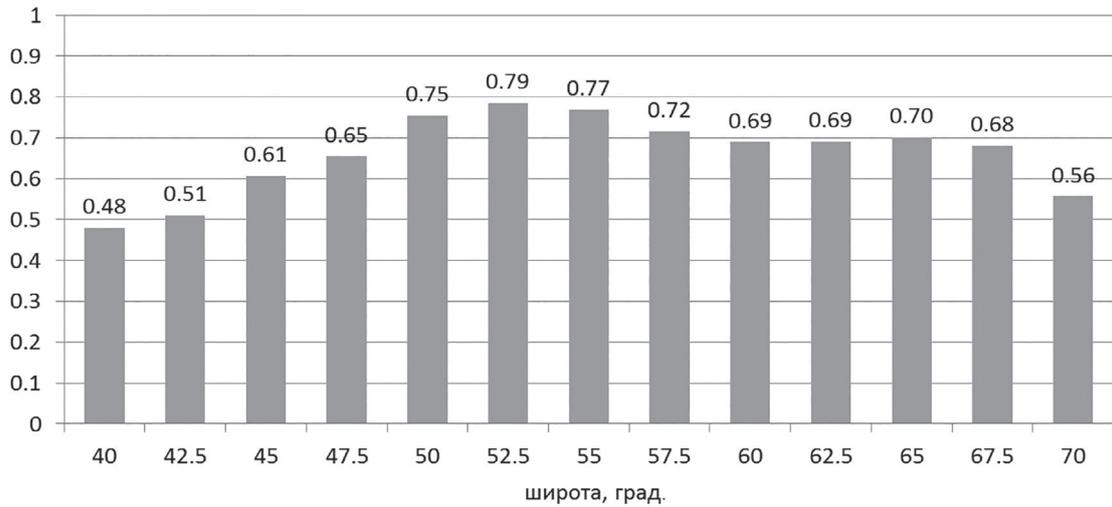


Рис. 8. Распределение коэффициента детерминации восстановления годовых значений полного зонального потока влаги на разрезе 5° в. д. по первым трем главным компонентам [Малинин, Гордеева, 2019]

Fig. 8. Distribution of the determination coefficients of reconstruction of annual total zonal moisture flow values in the 5E section according to the first three principal components [Malinin, Gordeeva, 2019]

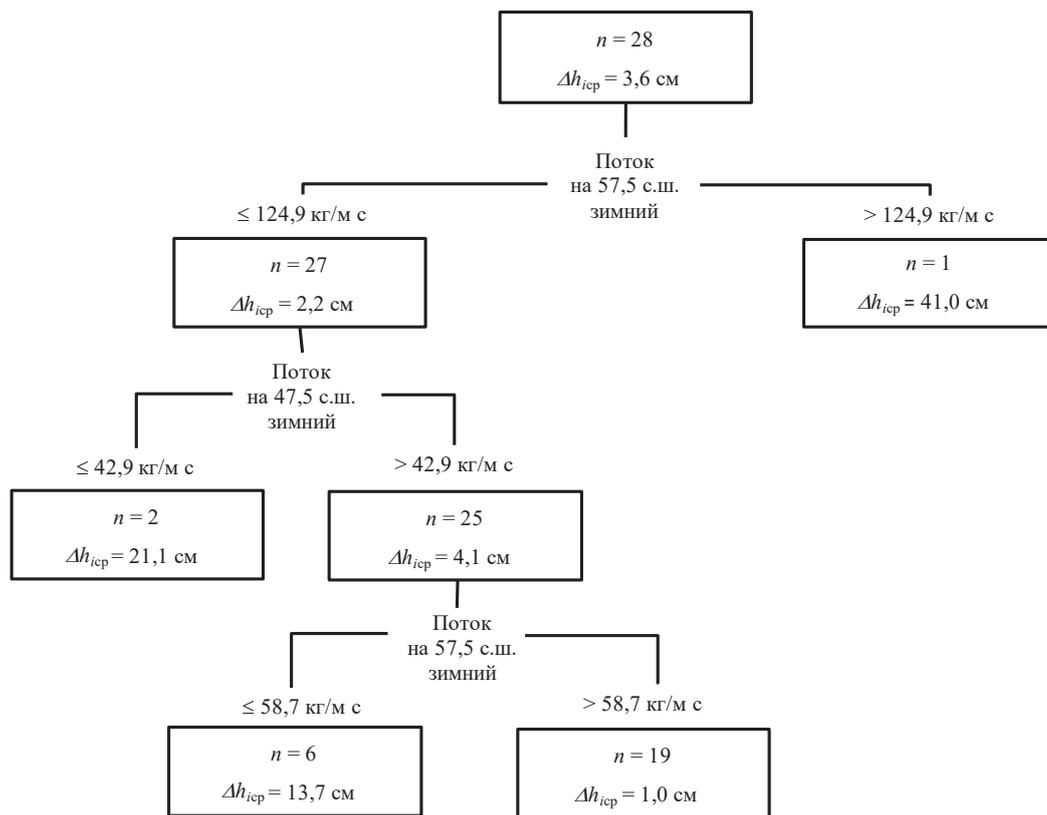


Рис. 9. Дерево решений, описывающее годовое приращение уровня Каспийского моря в *i*-год в зависимости от полного зонального потока водяного пара на меридиональном разрезе 5° в. д. для зимнего (октябрь–март) и летнего (апрель–сентябрь) периодов года за 1981–2009 гг.

Величина $\Delta h_{иср}$ – среднее значение для *n* лет.

Fig. 9. Decision tree describing the Caspian Sea level annual increment for *i*-year depending on total zonal moisture flow values for the cold (October–March) and warm (April–September) half-year in 1981–2009 at the 5E meridional section

The value $\Delta h_{иср}$ means the average value for *n* years.

нием 21 см. На третьем ветвлении разделителем опять является поток влаги на широте 57,5° с. ш. Этого оказывается достаточно для хорошего соответствия рассчитанных значений приращений уровня моря его фактическим значениям. Коэффициент детерминации построенного дерева составляет $R^2 = 0,66$, стандартная ошибка оценки приращений уровня модели – 7,8 см, или 57 % от их среднеквадратического отклонения, равного 13,7 см.

Итак, можно сделать однозначный вывод, что *уровень Каспийского моря является интегральным индикатором крупномасштабного влагообмена в системе «Северная Атлантика – атмосфера – бассейн Волги».*

Заключение

К сожалению, проблема генезиса межгодовых колебаний УКМ и тем более его сверхдолгосрочного прогноза до настоящего времени относится к числу центральных нерешенных проблем современной гидрометеорологии. Действительно, вряд ли кто-то сможет дать научно обоснованное предсказание о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. А в том, что это когда-то произойдет, нет сомнений.

Совершенно правильно в обзорной монографии [Водный..., 2016], содержащей сведения практически обо всех результатах в области изучения водного баланса, колебаний уровня моря и методах их прогноза, отмечается отсутствие ясного понимания механизмов, управляющих изменчивостью уровня. Однако еще в 1990-е годы такие механизмы были рассмотрены одним из авторов [Малинин, 1994а, б] в рамках генетической модели формирования межгодовых колебаний УКМ и сделан вывод о том, что уровень Каспия следует воспринимать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша». При этом достаточно уверенно можно утверждать, что генезис межгодовых колебаний УКМ обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. В данной работе приводится детализация генетической концепции, связанная с уточнением влияния Северной Атлантики на зональный перенос атмосферной влаги в Европу, а переноса влаги – на формирование межгодовых колебаний осадков в бассейне Волги, которые, в свою очередь, определяют изменчивость годового стока Волги и, следовательно, уровня Каспия.

Литература

- Абузьяров З. К. Усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. 2009. Вып. 343. С. 48–66.
- Варущенко С. И., Варущенко А. Н., Клиге Р. К. Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
- Гордеева С. М., Малинин В. Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 30–44.
- Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд. РГГМИ, 1994а. 160 с.
- Малинин В. Н. О генезисе межгодовых колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994б. № 4–5. С. 492–499.
- Малинин В. Н. Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 6. С. 7–16.
- Малинин В. Н., Гордеева С. М., Горбушина Я. А. К оценке влияния Северной Атлантики на перенос атмосферной влаги в Европу // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 179–185.
- Малинин В. Н., Гордеева С. М., Гурьянов Д. В. Малопараметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 35–49.
- Малинин В. Н., Радикевич В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А. Изменчивость вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 171 с.
- Мещерская А. В., Александрова Н. А. Прогноз уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. 1993. № 3. С. 72–82.
- Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Российский гидрометеорологический портал: ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/158total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.10.2019).
- Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: ЛГУ, 1988. 189 с.
- Bramer M. Principles of Data Mining. London: Springer-Verlag, 2007. 344 p. doi: 10.1007/978-1-84628-766-4
- Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and regression trees. New York: Chapman and Hall, 1984. 358 p.
- Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica help/Stat-Soft inc. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/InteractiveTrees-CRTCHAID_HIndex (дата обращения: 25.10.2019).
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP – DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. of the Atmos. Met. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631–1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631
- Malinin V. N., Gordeeva S. M. Variability of evaporation and precipitation over the ocean from satellite

data // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. Vol. 53, no. 9. P. 934–944. doi: 10.1134/S0001433817090195

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of moisture exchange in the Northern Atlantic on European Russia moistening and annual Volga runoff // *Water Re-*

sources. 2019. Vol. 46, no. 3. P. 466–479. doi: 10.1134/S009780781903014X

Поступила в редакцию 04.11.2019

References

Abuzyarov Z. K. Usovershenstvovannyi metod prognoza godovogo khoda urovnya Kaspiiskogo morya [An improved method for predicting the annual level of the Caspian Sea]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Hydrometeorological Research and Forecasting]. 2009. No. 343. P. 48–66.

Gordeeva S. M., Malinin V. N. Ispol'zovanie Data Mining v zadache gidrometeorologicheskogo prognozirovaniya [Use of Data Mining in hydrometeorological forecasting]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2016. No. 44. P. 30–44.

Malinin V. N. Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya [The problem of predicting the Caspian Sea level]. St. Petersburg: RSHI Publ., 1994a. 160 p.

Malinin V. N. O genezise mezhgodovykh kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya [On the genesis of inter-annual fluctuations in the level of the Caspian Sea]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1994b. No. 4–5. P. 492–499.

Malinin V. N. Dolgosrochnoe prognozirovanie urovnya Kaspiiskogo morya [Long-term forecasting of the Caspian Sea level]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Izv. RAS. Geographical ser.]. 2009. No. 6. P. 7–16.

Malinin V. N., Gordeeva S. M., Gorbushina Ya. A. K otsenke vliyaniya Severnoi Atlantiki na perenos atmosferno vlagi v Evropu [To the estimation of the North Atlantic influence on the water vapour transfer to the European continent]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development: Terra Humana]. 2015. No. 3. P. 179–185.

Malinin V. N., Gordeeva S. M., Gur'yanov D. V. Maloparametricheskaya model' uvlazhneniya Severo-Zapadnogo regiona Rossii dlya uslovii sovremennykh izmenenii klimata [Simple parametric humidification model of northwestern Russia for the conditions of modern climate change]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2014. No. 36. P. 35–49.

Malinin V. N., Radikevich V. M., Gordeeva S. M., Kulikova L. A. Izmenchivost' vikhrevoi aktivnosti atmosfery nad Severnoi Atlantikoi [The variability of atmosphere vortex activity over the North Atlantic]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003. 171 p.

Meshcherskaya A. V., Aleksandrova N. A. Prognoz urovnya Kaspiiskogo morya po meteorologicheskim dannym [Caspian Sea level forecast based on meteorolo-

gical data]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russ. Meteorology and Hydrology]. 1993. No. 3. P. 72–82.

Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii [Description of data set of monthly precipitation totals from Russian stations]. *Rossiiskii gidrometeorologicheskii portal: VNIIGMI-MTsD* [RIHMI-WDC]. URL: <http://meteo.ru/english/climate/descrip7.htm> (accessed: 25.10.2019).

Smirnov N. P., Malinin V. N. Vodnyi balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha [Atmospheric water balance as a hydrological task]. Leningrad: LSU Publ., 1988. 189 p.

Varushchenko S. I., Varushchenko A. N., Klige R. K. Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni [Changes in the regime of the Caspian Sea and inland reservoirs in paleotime]. Moscow: Nauka, 1987. 240 p.

Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz [Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and predicting]. Moscow: Triada Ltd, 2016. 378 p.

Bramer M. Principles of Data Mining. London: Springer-Verlag, 2007. 344 p. doi: 10.1007/978-1-84628-766-4

Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and regression trees. New York: Chapman and Hall, 1984. 358 p.

Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica help. StatSoft inc. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/Interactive-TreesCRTCHAID_HIndex (accessed: 25.10.2019).

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP – DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. of the Atmos. Met. Soc.* 2002. Vol. 83. P. 1631–1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Variability of evaporation and precipitation over the ocean from satellite data. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. Vol. 53, no. 9. P. 934–944. doi: 10.1134/S0001433817090195

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of moisture exchange in the Northern Atlantic on European Russia moistening and annual Volga runoff. *Water Resources.* 2019. Vol. 46, no. 3. P. 466–479. doi: 10.1134/S009780781903014X

Received November 04, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Малинин Валерий Николаевич

профессор каф. прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК
и комплексного управления прибрежными зонами, д. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: malinin@rshu.ru

Гордеева Светлана Михайловна

доцент кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК
и комплексного управления прибрежными зонами, к. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: gordeeva@rshu.ru
тел.: 89111603085

CONTRIBUTORS:

Malinin, Valery

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: malinin@rshu.ru

Gordeeva, Svetlana

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: gordeeva@rshu.ru
tel.: +79111603085

УДК 556.546 (470.22) »332.092»

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭСТУАРИИ РЕКИ КЕМЬ В СЕНТЯБРЕ 2019 г.

А. В. Толстикова, Н. Е. Галахина, Р. Э. Здорвеннов

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

Проведены гидрофизические и гидрохимические исследования в эстуарии р. Кемь в период 4–5 сентября 2019 г. Изучалось вертикальное распределение температуры, солёности, хлорофилла *a*, мутности и кислорода при помощи STD-зондов; в пробах воды на рейдовых вертикалях проведен химический анализ (определяли рН, электропроводность, минеральный состав, содержание биогенных элементов, органического вещества, Fe_{общ.}, Mn, загрязняющих и взвешенных веществ). Получены новые данные по распределению указанных параметров в зависимости от фаз прилива. Температура, солёность, показатели мутности и хлорофилла *a* характерны для этого времени года. Вода р. Кемь является низкоминерализованной мезогумусной мезотрофной. Среди форм азота преобладает органическая, в то время как концентрации минеральных форм достаточно низкие, что является характерным для поверхностных вод гумидной зоны. Органическое вещество в основном представлено природным аллохтонным веществом (77–80 %), поступающим с водосборной территории. Среди загрязняющих веществ определено содержание нефтепродуктов и некоторых тяжелых металлов. Незначительное превышение ПДК отмечается для свинца на участке реки в районе железнодорожного моста. Выявлено превышение ПДК по общему железу и марганцу для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение, их содержание в воде р. Кемь составляет 0,55 (ПДК = 0,1) и 0,32 (ПДК = 0,01) мг/л соответственно, что является геохимической особенностью вод региона, а не показателем загрязнённости. Полученные данные согласуются с опубликованными ранее.

Ключевые слова: гидрофизические исследования; гидрохимический режим; эстуарий; приливная динамика; загрязнённость.

A. V. Tolstikov, N. E. Galakhina, R. E. Zdorvennov. HYDROPHYSICAL AND HYDROCHEMICAL STUDIES IN THE KEM' RIVER ESTUARY IN SEPTEMBER 2019

Hydrophysical and hydrochemical surveys of the Kem' river estuary were implemented on September 4–5, 2019. The vertical distribution of temperature, salinity, chlorophyll-*a*, turbidity, and oxygen were studied, and chemical analysis of the water was carried out (pH, electrical conductivity, mineral composition, nutrient content, organic matter, total iron and manganese, pollutants and suspended solids). New data were obtained on the distribution of these parameters depending on the phases of the tide. Temperature, salinity, turbidity and chlorophyll-*a* are typical for this time of year. Water in the Kem' River is low-TDS, mesohumic, mesotrophic. Nitrogen is mostly in organic form, while the concentration of its mineral forms is quite low, which is typical of surface waters in the humid

zone. Organic matter is mainly represented by natural allochthonous matter (77–80 %) incoming from the catchment. Among the pollutants, the content of oil products and some heavy metals was determined. The MPC for lead was slightly exceeded in the river around the railway bridge. The MPC for total iron and manganese was exceeded in water bodies of significance for fisheries. The content of these elements in the Kem' River water was 0.55 mg/l (MPC = 0.1 mg/l) and 0.32 mg/l (MPC = 0.01 mg/l), respectively, which is a geochemical feature of the region's waters rather than an indicator of pollution. These results are consistent with previously published data.

Keywords: hydrophysical studies; hydrochemical regime; estuary; tidal dynamics; pollution.

Введение

Река Кемь является крупнейшим притоком Белого моря с территории Республики Карелия, часть водосбора находится в Финляндии. Исток реки расположен в оз. Нижнее Куйто, устье представляет собой частично перемешиваемый эстуарий [Радченко и др., 2019]. Питание смешанное, преобладает снеговое. За весеннее половодье проходит до 50 % стока. Река зарегулирована, на ней расположен каскад из пяти ГЭС. Длина реки составляет 191 км, площадь водосбора – 27 700 км², средний уклон – 0,52 %, среднегодовой модуль стока 9,35 л/с·км², годовой объем стока 8,18 км³, по данным до 1980 г. [Многолетние..., 1987]. Однако в последние годы отмечаются изменения, связанные с увеличением объема водного и теплового стока, ростом температуры воды в устье. Так, величина модуля стока за 1990 г. составила 10,1 л/с·км², а за период 1990–2015 гг. – 10,7 л/с·км²; объем стока за 1990 г. – 8,76 км³, за период 1990–2017 гг. – 9,35 км³ [Карпечко и др., 2018]. Кроме того, несколько лет устье р. Кемь активно заиливается и зарастает. В г. Кемь до сих пор не построены очистные сооружения, и канализация от города с населением более десяти тысяч человек без какой-либо очистки сбрасывается в реку.

После отдельных работ в XX в. регулярные гидрофизические исследования на р. Кемь выполнялись в летний период в начале 2000-х годов [Долотов и др., 2004, 2006; Здоровеннов, 2004; Shevchenko et al., 2005], в последующие годы измерения были эпизодическими, и эти данные немногочисленны [Чебанова, 2016].

Гидрохимические исследования р. Кемь проводились в 1961–1962 гг. [Максимова, 2007], в 1980–1984 гг. [Сабылина, Селиванова, 1989], в начале 1990-х гг. [Лозовик, 1998; Феокистов, 2004; Лозовик и др., 2005; Shevchenko et al., 2005], в летний период 2007–2011 гг. [Потапова, 2012]. Отдельно изучалась геохи-

мия донных осадков по данным 2001 и 2003 гг. [Демина и др., 2005]. Также стоит отметить обобщающие работы по химическому стоку рек водосбора Белого моря, в которых уделено внимание этому водотоку [Гордеев и др., 2012; Gordeev et al., 2018]. Анализ изменчивости состава и биомассы фитопланктона р. Кемь последних лет показан в работах [Радченко и др., 2013, 2019].

Цель работы заключалась в исследовании гидрофизических и гидрохимических параметров в р. Кемь под влиянием приливных процессов.

Материалы и методы

Экспедиционные работы в устье р. Кемь проводились 4–5 сентября 2019 года на девяти станциях (схема представлена на рис. 1) дважды: в фазу прилива и в фазу отлива. Станции К-9 и К-8 были выбраны в качестве фоновых точек в речной и морской части эстуария за пределами градиентной зоны. Высота полусуточного прилива составляла примерно 1,4 м, фазы прилива рассчитаны с использованием программы WXTide32.

Проведенные работы включали в себя гидрофизические и гидрохимические исследования. Гидрофизические измерения выполнены с использованием зондов CTD90M Sea&Sun Technology (Германия) и CTD RBRconcerto (Канада), с помощью которых на всех девяти станциях получены профили вертикального распределения температуры, солёности, мутности, растворенного кислорода и хлорофилла *a*. Технические характеристики приборов приведены в табл. 1.

Для гидрохимических исследований были выбраны станции К-1, К-3, К-8 и К-9. В пробах воды со станций К-1 и К-9 проведен подробный химический анализ. В них определяли рН, электропроводность, взвешенное вещество, минеральный состав (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), биогенные элементы (формы азота, $\text{P}_{\text{мин}}$, $\text{P}_{\text{общ}}$, Si), органическое вещество ($\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК,

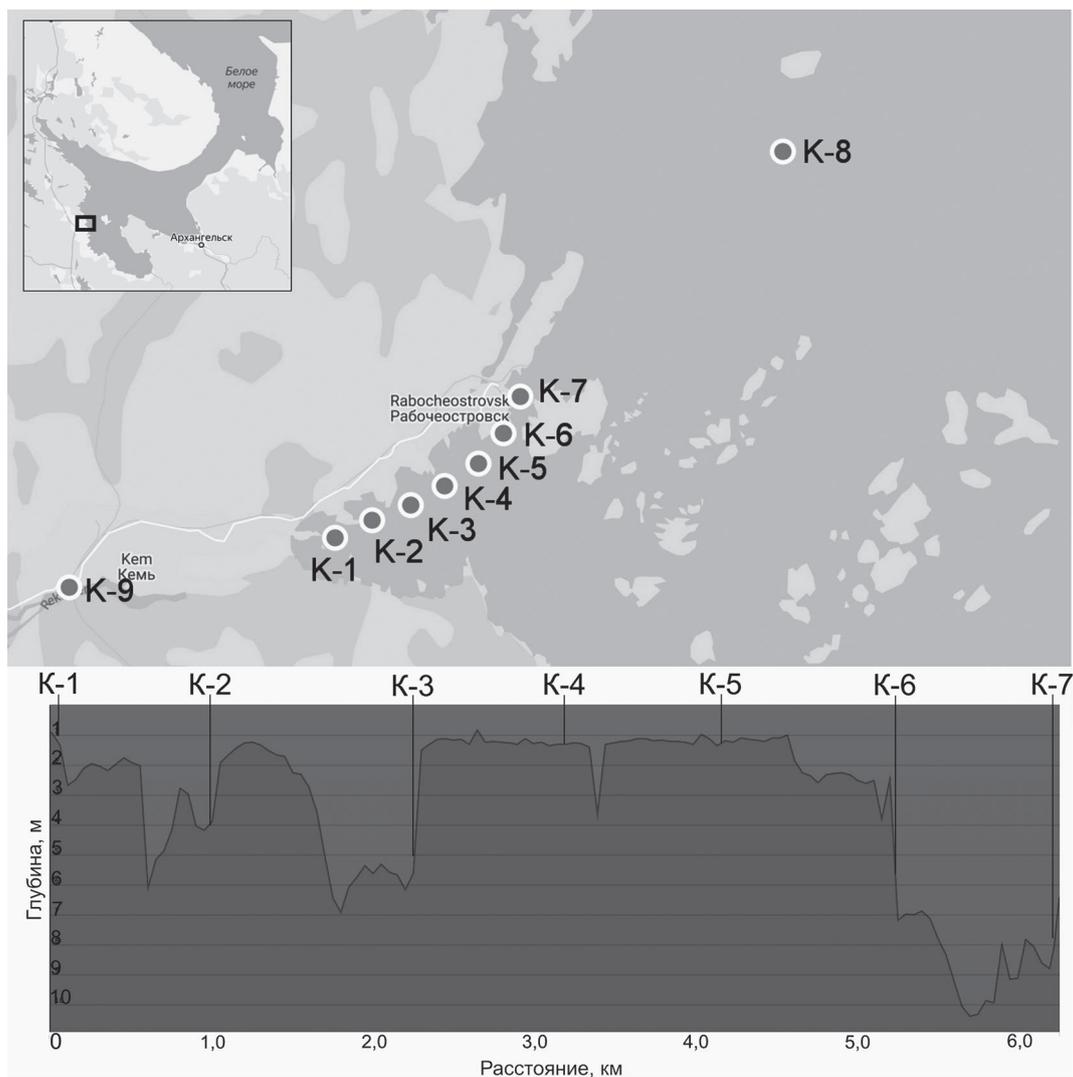


Рис. 1. Карта-схема станций в эстуарии р. Кемь с рельефом дна по разрезу К-1 – К-7
 Fig. 1. Scheme of the stations in the estuary zone of the Kem' River with bottom relief along the K-1 – K-7 section

Таблица 1. Технические характеристики приборов

Table 1. Specifications of instruments

Датчики Sensors	Диапазон Range	Точность Accuracy
CTD-90M Sea&Sun Technology		
Давление Pressure	20 бар 20 bar	± 0,1 % FS
Температура, °C Temperature	-2...+35	± 0,005
Электропроводность, mS/cm Conductivity	0-60	± 0,020
Мутность Turbidity	0-1000 FTU	-
Флюориметр Fluorimeter	0-10 мкг/л 0-10 µg/l	0,8 %
CTD RBRconcerto		
Растворенный кислород, % Dissolved oxygen	0-120	± 5

ПО, цветность, гумусовые вещества), $Fe_{\text{общ}}$, Mn и загрязняющие вещества (нефтепродукты, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Cd). В пробах воды, отобранных на станциях К-3 и К-8, определяли содержание только биогенных элементов ($N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$, $N_{\text{общ}}$, $N_{\text{орг}}$, $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$ и Si). Все химические анализы выполнены в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН по соответствующим методикам [Аналитические..., 2017].

Кроме того, в ходе работ с помощью эхолота Garmin Echomap 50s были сделаны батиметрические промеры по разрезу от станции К-1 до станции К-7. Результаты этих промеров представлены на рис. 1, на котором видно, что рельеф дна в эстуарии реки сложный, вверх по течению имеются локальные ямы с глубинами до 7 м. Это влияет на распространение приливной волны и на перенос взвешенных веществ,

на что обращено внимание в работе [Радченко и др., 2019].

Полученные результаты сравнивались с данными выполненных ранее исследований, а также работ, проведенных при участии авторов [Долотов и др., 2004, 2006].

Результаты и обсуждение

Распределение температуры, солёности, показателей мутности и хлорофилла а было классическим, характерным для этого времени года (рис. 2). Сопоставление полученных результатов с известными ранее данными в какой-то степени осложняет тот факт, что в предыдущие годы гидрофизические работы и взятие проб воды на химический анализ проводились в основном летом [Радченко и др., 2019].

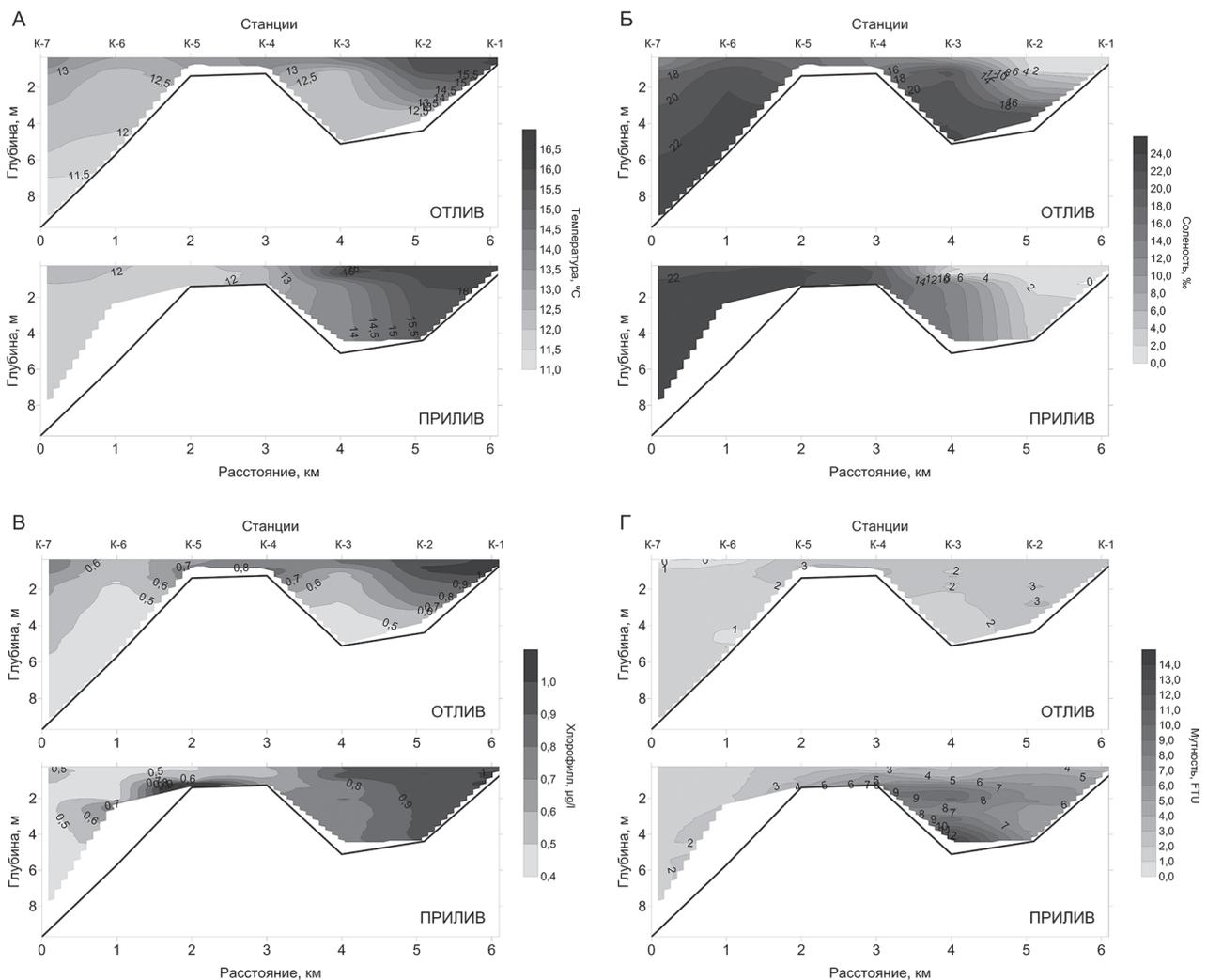


Рис. 2. Распределение температуры (А), в °С, солёности (Б), в ‰, хлорофилла а (В), в мг/л, и мутности (Г), в FTU, в фазу прилива и отлива в эстуарии р. Кемь

Fig. 2. Distribution of temperature (A), in °C, salinity (B), in ‰, chlorophyll-a (B), in mg/l, and turbidity (Г), in FTU during the tidal phases in the estuary of the Kem' River

Тем не менее гидрологический режим р. Кемь в начале сентября относится к фазе периода открытого русла, продолжается летняя межень, еще отсутствуют ледовые явления. Поэтому можно утверждать, что сравнение с летними данными уместно.

Особенностью динамики трансформации приливной волны в устье р. Кемь является то, что из-за мелководья в районе станций К-4 и К-5 на отливе выражена стратификация на участке акватории К-4 – К-1, нарушаемая во время прилива (рис. 2). Во время отлива здесь же (К-4 – К-1) отмечена более низкая температура и более высокая соленость по сравнению с приливом. Это происходит благодаря морфометрическим особенностям эстуария, что мешает быстрой смене вод при смене фаз прилива. Причины этого явления и гидродинамические эффекты, которые наблюдаются в эстуарии р. Кемь, включая особенности нелинейной динамики трансформации приливной волны на мелководье, подробно рассмотрены в работе [Зырянов и др., 2015]. На участке, открытом в сторону моря (К-5 – К-7), – распределение, классическое для эстуариев: на отливе вода более теплая и менее соленая по сравнению с приливом.

Наиболее ярко выраженная фронтальная зона расположена в районе станций К-3 – К-4, на склоне перепада глубин от 1 до 7 м.

Распределение хлорофилла *a*, мутности (рис. 2) и кислорода (рис. 3) на отливе также стратифицировано в яме (К-1 – К-4). Концентрация хлорофилла *a* на поверхности около 1 мг/л, у дна – 0,5 мг/л, что соответствует данным, полученным ранее [Радченко и др., 2019].

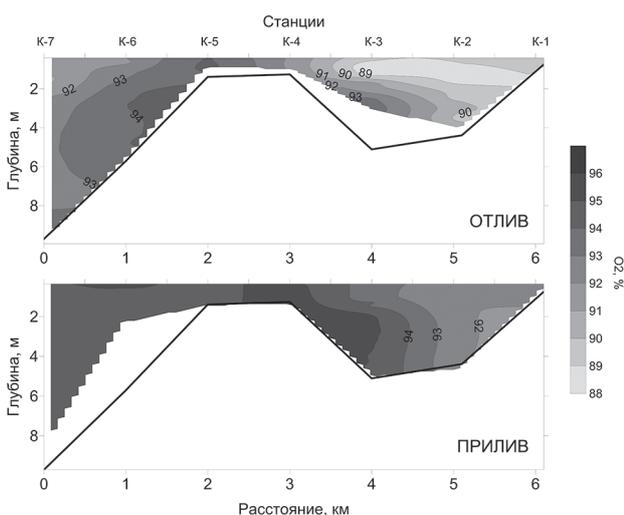


Рис. 3. Распределение кислорода по разрезу К-1 – К-7, в %

Fig. 3. Distribution of oxygen along the K-1 – K-7 section, in %

Распределение кислорода подчиняется тем же закономерностям, что и другие параметры, указанные выше. На отливе наблюдается стратификация на участке разреза К-1 – К-4, нарушаемая на приливе. В процентном содержании и на приливе, и на отливе различия незначительные, от поверхности до дна содержание растворенного кислорода около 90 % согласно оптическому датчику зонда RBRconcerto.

В качестве фоновых использовались станции К-8 и К-9 (рис. 4).

На ст. К-8 хорошо выражена стратификация. До горизонта 4 м наблюдалась гомотермия, с температурой около 10 °С и соленостью 25 ‰. На более глубоких горизонтах температура закономерно понижается и повышается соленость. Показатели концентрации хлорофилла *a* (0,3 мг/л) и мутности (в среднем 0,6 FTU) с глубиной изменяются незначительно. Ст. К-9 расположена в речной воде; температура воды здесь составила 16 °С. Насыщение кислородом было около 95 % для обеих фоновых станций.

Пробы воды, отобранные на станциях К-1 и К-9, не отличаются по химическому составу. Вода имеет низкую минерализацию (17,8 мг/л), ее ионный состав можно выразить следующей формулой:



Согласно классификации О. А. Алекина [1970] вода р. Кемь относится к гидрокарбонатному классу группы кальция и магния, что является типичным для водных объектов Республики Карелия.

В распределении форм азота в воде преобладает органическая, тогда как концентрации минеральных форм достаточно низкие (табл. 2), что характерно для поверхностных вод гумидной зоны [Лозовик, 2017].

Воды речного стока богаче поверхностных морских вод биогенными элементами (особенно кремнием и соединениями азота), соответственно, зоны, подверженные их воздействию, характеризуются повышенными концентрациями этих элементов [Максимова, 1990]. На рис. 5 показано распределение биогенных элементов в фазы отлива и прилива в эстуарии р. Кемь (разрез К-9 – К-8), где проявляется влияние речного стока на формирование химического состава воды в зоне смешения, главным образом по кремнию.

Вода в р. Кемь имеет околонеутральную реакцию среды 6,7–6,9 (табл. 3). Отмечается высокая цветность ее воды, в среднем 65 град.

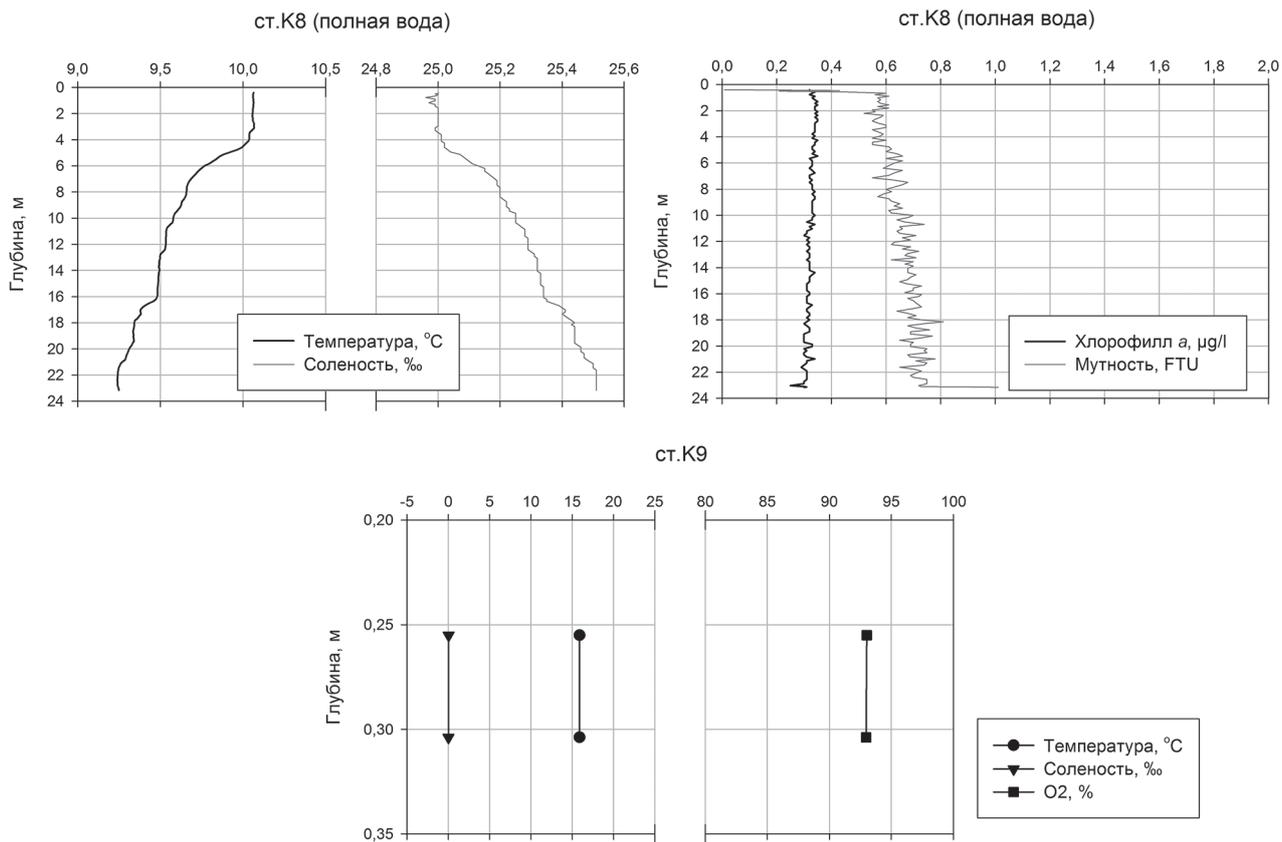


Рис. 4. Распределение температуры, солености, хлорофилла а, мутности и кислорода на фоновых станциях К-8 и К-9

Fig. 4. Distribution of temperature, salinity, chlorophyll-a, turbidity, and oxygen at the K-8 and K-9 background stations

Таблица 2. Содержание биогенных элементов в воде р. Кемь в сентябре 2019 г.

Table 2. Content of nutrients in the Kem' River water in September 2019

Станция Station	Горизонт, м Depth, m	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг} N _{org}	N _{общ} N _{tot}	P _{мин} P _{min}	P _{общ} P _{tot}	Si
		мг N/л mg N/L				мкг N/л µg N/L		мг/л mg/L	
К-1	0,5	0,014	< 0,001	0,02	0,46	0,49	< 1	16	1,9
К-9	0,5	0,009	< 0,001	0,02	0,40	0,43	2	13	1,7

По содержанию органического вещества, согласно классификации [Лозовик, 2013], р. Кемь является мезогумусной. Гумусность рассчитана по формуле [Лозовик, 2006]:

$$Hum = \sqrt{ЦВ \cdot ПО}, \quad (2)$$

где *Hum* – гумусность, *ЦВ* – цветность, *ПО* – перманганатная окисляемость.

Расчетное значение гумусности воды составляет 26 ед., что соответствует данному классу вод. Концентрация гумусовых веществ (ГВ) составляет 6,2 (ст. К-1) и 6,7 (ст. К-9) мг/л, т. е. органическое вещество в основном представлено природным аллохтонным веществом

(77–80 %), поступающим с водосборной территории р. Кемь.

Среди загрязняющих веществ определено содержание нефтепродуктов и некоторых тяжелых металлов (табл. 4). Незначительное превышение ПДК для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение [Нормативы..., 2016], отмечается по свинцу на станции К-9, которая располагается в районе железнодорожного моста. Выявлено превышение ПДК по Fe_{общ} и Mn [Нормативы..., 2016], что является геохимической особенностью вод региона, а не показателем их загрязненности [Лозовик, 2006].

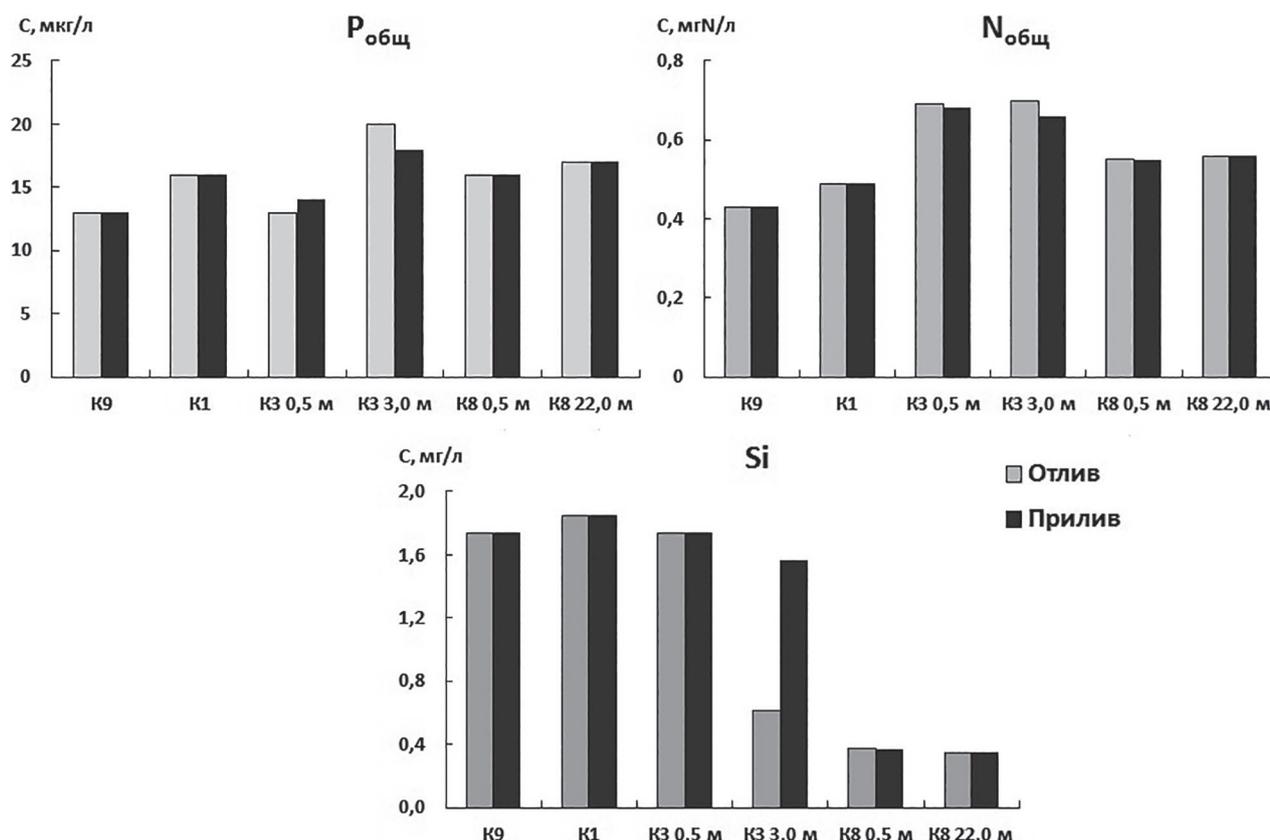


Рис. 5. Распределение биогенных элементов в эстуарии р. Кемь

Fig. 5. Distribution of nutrients in the estuary of the Kem' River

Таблица 3. Величина pH и содержание органического и взвешенного вещества в воде р. Кемь в сентябре 2019 г.

Table 3. pH value and organic and suspended matter content in the Kem' River water in September 2019

Станция Station	Горизонт, м Depth, m	ЦВ, град. Pt-Co шк. Color, grad.	ПО, мгО/л CODMn, mgO/L	БО*, мгО/л CODCr, mgO/L	Hum	C _{орг} , мг/л Corg, mg/L	ГВ, мг/л HM, mg/L	Взв. в-во, мг/л SM, mg/L	pH
K-1	0,5	64	10,5	22,8	26	8,1	6,2	0,6	6,9
K-9	0,5	66	10,5	23,5	26	8,4	6,7	0,2	6,7

Примечание. *Бихроматная окисляемость.

Note. *Dichromate oxidizability.

Если сравнить данные по химическому составу воды р. Кемь, полученные в сентябре 2019 г., с результатами более ранних наблюдений, то можно выделить некоторые межгодовые отличия (табл. 5). Отмечается изменчивость величины минерализации воды, цветности, содержания железа и марганца, а также некоторых форм азота и фосфора. Выявленные межгодовые отличия в химическом составе воды р. Кемь связаны с разной водностью года, увеличение которой сопровождается снижением минерализации и ростом содержания природных органических веществ [Феоктистов, 2004]. Так, в 1991 г. средний

расход р. Кемь за август–сентябрь составил 534 м³/с, в 1993 г. – 753 м³/с [Карпечко и др., 2018].

Выводы

1. Распределение температуры, солёности, показателей мутности, хлорофилла *a* и кислорода в р. Кемь было характерным для этого времени года и соответствовало показателям летней межени. И качественно, и количественно данные согласуются с результатами, полученными ранее [Долотов и др., 2004, 2006; Радченко и др., 2019].

Таблица 4. Содержание нефтепродуктов, Fe_{общ}, Mn и тяжелых металлов в воде р. Кемь в сентябре 2019 г.

Table 4. Content of oil products, Fe_{tot}, Mn and heavy metals in the Kem' River water in September 2019

Станция Station	Нефтепродукты Oil products	Fe _{общ} Fe _{tot}	Mn	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	Ni
		мг/л mg/L			мкг/л µg/L				
К-1	< 0,01	0,54	0,028	2,5	5,7	0,7	0,02	1,0	0,5
К-9	0,02	0,55	0,036	2,4	7,5	0,8	0,01	1,3	0,5
ПДК* MPC	0,05	0,10	0,01	10	6	1	5	-	10

Примечание. *ПДК для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение.

Note. *MPC for the water of water bodies of fishery importance.

Таблица 5. Некоторые показатели химического состава воды р. Кемь в 1991 и 1993 гг.

Table 5. Some chemical composition parameters of the Kem' River water in 1991 and 1993

Год наблюдений Year of observation	Σ _{ион'} Σ _i мг/л mg/L	ЦВ, град. Color, grad.	P _{мин} P _{min}	P _{общ} P _{tot}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг} N _{org}	Fe _{общ} Fe _{tot}	Mn	Si	pH
			мкг/л µg/L		мгN/л mgN/L		Мг/л mg/L				
1991*	19,6	58	-	-	-	0,03	-	0,32	0,02	2,1	-
Июнь 1993** June 1993	11,1	112	< 1	8	0,04	0,02	0,25	0,46	-	2,1	6,2

Примечание. *По данным: [Феоктистов, 2004], среднегодовые значения; **по данным: [Лозовик, 1998]; прочерк – нет данных.

Note. *After [Feoktistov, 2004], annual average; **after [Lozovik, 1998]; line – no data.

2. Река Кемь является типичным представителем поверхностных вод Карелии. По химическому составу воды ее можно охарактеризовать как низкоминерализованную мезогумусную мезотрофную с повышенным содержанием железа и марганца.

3. Несмотря на антропогенную нагрузку от г. Кемь, существенных различий в химическом составе воды в пробах, отобранных до города и после, не наблюдается. Вероятно, объем загрязняющих веществ невелик относительно объема стока р. Кемь.

4. Данные по химическому составу воды р. Кемь, полученные в осенний период 2019 г., согласуются с опубликованными ранее [Сабылина, Селиванова, 1989; Лозовик, 1998; Максимова, 2007].

Работа выполнена в рамках темы государственного задания КарНЦ РАН «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № АААА-А18-118032290034-5.

Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 442 с.

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

Гордеев В. В., Филиппов А. С., Кравчишина М. Д., Новигатский А. Н., Покровский О. С., Шевченко В. П., Дара О. М. Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.

Демина Л. Л., Филиппова К. В., Шевченко В. П., Новигатский А. Н., Филиппов А. С. Геохимия донных осадков в зоне смешения реки Кемь (Белое море) // Океанология. 2005. Т. 45, № 6. С. 851–865.

Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Петров М. П., Кутчева И. П., Толстиков А. В., Новигатский А. Н., Политова Н. В., Платонов А. В., Филиппов А. С. О характере природных процессов в фазы прилива и отлива в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Океанология. 2004. Т. 44, № 5. С. 784–792.

Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э., Платонов А. В., Шевченко В. П., Римский-Корсаков Н. А., Кутчева И. П., Денисенко Н. В., Немова Н. Н. О комплексных исследованиях эстуариев Карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: Мат-лы юбил. конф., посвящ. 15-летию ИВПС. Петрозаводск, 2006. С. 463–473.

Здоровеннов Р. Э. Приливный перенос примеси в прибрежных районах Белого моря: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2004. 24 с.

Зырянов В. Н., Чебанова М. К., Филатов Н. Н. Интрузия морских вод в устьях рек // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 492–503. doi: 10.7868/S032105961505020X

Карпечко В. А., Махальская Н. И., Балаганский А. Ф., Толстиков А. В. Сток рек бассейна Белого моря // Свид. о гос. рег. базы данных № 2018621833. 19 ноября 2018 г.

Лозовик П. А. Притоки Белого моря. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия по результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 164–168.

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

Лозовик П. А. Органическое вещество и биогенные элементы в объектах гидросферы. Источники поступления, внутриводоемные процессы образования и трансформации // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всерос. симп. с междунар. участием. Барнаул, 2017. С. 141–147.

Лозовик П. А., Басов М. И., Литвиненко А. В. Оценка поступления химических веществ в гидрографическую сеть с водосборной территории Карелии // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 584–588.

Максимова М. П. Гидрохимия Белого моря: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 1990. 51 с.

Максимова М. П. Состояние малых рек водосбора. Гидрохимия // Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 74–104.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши СССР. Т. 1. РСФСР. Вып. 7. Бассейны рек Западного побережья Белого моря. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 219 с.

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормати-

вы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Утв. Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552).

Потапова И. Ю. Биогенные элементы и органическое вещество в воде прибрежной части Белого моря // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Мат-лы V Всерос. симп. с междунар. участием. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 274–276.

Радченко И. Г., Ильяш Л. В., Шевченко В. П. Летний фитопланктон в маргинальном фильтре реки Кеми (Онежский залив Белого моря) // Геология морей и океанов: Мат-лы XX Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2013. С. 223–226.

Радченко И. Г., Ильяш Л. В., Шевченко В. П., Здоровеннов Р. Э., Новигатский А. Н., Политова Н. В., Толстиков А. В. Пространственное распределение фитопланктона в субарктическом эстуарии (река Кемь, Белое море) // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 335–346. doi: 10.31857/S0030-1574593335-346

Сабылина А. В., Селиванова Е. А. Химический состав и качество воды р. Кеми // Современный режим природных вод бассейна р. Кемь. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1989. С. 165–180.

Феоктистов В. М. Химический состав и вынос растворенных веществ водами рек Карельского побережья в Белое море // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 6. С. 683–690.

Чебанова М. К. Процессы смешения речных и морских вод и трансформации приливных волн в эстуариях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 27 с.

Gordeev V. V., Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S. The geochemical features of the river discharge to the White Sea // Handb. Environ. Chem. 2018. Vol. 81. P. 47–81. doi: 10.1007/698_2018_329

Shevchenko V. P., Alexeeva T. N., Filippov A. S., Novigatskiy A. N., Pautova L. A., Politova N. V., Rat'kova T. N., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Platonov A. V., Nöthig E. M., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' river estuary, White Sea (Russia) // HESS. 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66.

Поступила в редакцию 06.02.2020

References

Alekin O. A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 442 p.

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

Chebanova M. K. Protsessy smesheniya rechnykh i morskikh vod i transformatsii prilivnykh voln v estuariyakh [The processes of mixing river and sea waters and the transformation of tidal waves in estuaries]: Summary of PhD (Cand. of Phis.-Math.) thesis. Moscow, 2016. 27 p.

Demina L. L., Filip'eva K. V., Shevchenko V. P., Novigatskii A. N., Filippov A. S. Geokhimiya donnykh osadkov v zone smesheniya reki Kem' (Beloe more) [Geochemistry of the bottom sediments in the mixing zone of the Kem' River with the White Sea]. Okeanologiya [Oceanology]. 2005. Vol. 45, no. 6. P. 851–865.

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Shevchenko V. P., Petrov M. P., Kutcheva I. P., Tolstikov A. V., Novigatskii A. N., Politova N. V., Platonov A. V., Filippov A. S. O kharaktere prirodnykh protsessov v fazy priliva i otliva v estuariyakh Karel'skogo poberezh'ya Belogo morya [On the character of natural processes at high and low tides in the estuaries of the Karelian coast of the White

Sea]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2004. Vol. 44, no. 5. P. 784–792.

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Zdorovenov R. E., Platonov A. V., Shevchenko V. P., Rimskii-Korsakov N. A., Kutcheva I. P., Denisenko N. V., Nemovala N. N. O kompleksnykh issledovaniyakh estuariy Karel'skogo poberezh'ya Belogo morya [Multidisciplinary study of the estuaries and the coastal zone of the White Sea Karelian coast]. *Vodnye resursy Evropeiskogo Severa Rossii: itogi i perspektivy issled.: Mat. yubil. konf., posvyashch. 15-letiyu IVPS* [Water resources of the European North of Russia: results and perspectives. Proceed. conf. dedicated to the 15th anniv. of the Northern Water Probl. Inst.]. Petrozavodsk, 2006. P. 463–473.

Feoktistov V. M. Khimicheskii sostav i vynos rastvorennykh veshchestv vodami rek Karel'skogo poberezh'ya v Beloe more [Water chemical composition of Karelian rivers and their dissolved chemical discharge into the White Sea]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2004. Vol. 31, no. 6. P. 683–690.

Gordeev V. V., Filippov A. S., Kravchishina M. D., Novigatskii A. N., Pokrovskii O. S., Shevchenko V. P., Dara O. M. Osobennosti geokhimii rechnogo stoka v Beloe more [Features of the geochemistry of river runoff into the white sea]. *Sistema Belogo morya. T. 2. Vodnaya tolshcha i vzaimodeistviyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera* [The White Sea system. Vol. 2. Water column and atmosphere, cryosphere, the river runoff, and the biosphere interacting with it]. Moscow, 2012. P. 225–308.

Karpechko V. A., Makhal'skaya N. I., Balagan'skii A. F., Tolstikov A. V. Stok rek basseina Belogo morya [River runoff of the White Sea basin]. Svid. o gos. reg. bazy dannykh № 2018621833. 19 noyabrya 2018 g. [Database registration certificate No. 2018621833. Nov. 19, 2018].

Lozovik P. A. Pritoki Belogo morya. Khimicheskii sostav vody [Tributaries of the White Sea. Chemical composition of water]. *Sovr. sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg.* [Current state of water objects in the Republic of Karelia. Results of monitoring in 1992–1997]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998. P. 164–168.

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

Lozovik P. A. Geokhimicheskaya klassifikatsiya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony na osnove ikh kislotno-osnovnogo ravnovesiya [Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid-base equilibrium]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2013. Vol. 40, no. 6. P. 583–592.

Lozovik P. A. Organicheskoe veshchestvo i biogenne elementy v ob'ektakh gidrosfery. Istochniki postupleniya, vnutrivodoemnye protsessy obrazovaniya i transformatsii [Organic matter and nutrients in hydrosphere objects. Sources of input, intrabasin processes of formation and transformation]. *Organich. veshchestvo i biogenne elementy vo vnutr. vodoemakh i mor-*

skikh vodakh: Trudy VI Vseross. simpoz. s mezhd. uch. [Organic matter and nutrients in inland waters and sea waters: Proceed. VI All-Russ. symp. with int. part.]. Bar-naul, 2017. P. 141–147.

Lozovik P. A., Basov M. I., Litvinenko A. V. Otsenka postupleniya khimicheskikh veshchestv v gidrograficheskuyu set' s vodosbornoi territorii Karelii [Assessment of chemical input into the drainage network from Karelian river basins]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2005. Vol. 32, no. 5. P. 584–588.

Maksimova M. P. Gidrokhiimiya Belogo morya [Hydrochemistry of the White Sea]: Summary of DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow, 1990. 51 p.

Maksimova M. P. Sostoyaniye malykh rek vodosbora. Gidrokhiimiya [State of small catchment rivers. Hydrochemistry]. *Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov* [The White Sea and its catchment under climate and man-induced impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 74–104.

Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi SSSR. T. 1. RSFSR. Vyp. 7. Basseiny rek Zapadnogo poberezh'ya Belogo morya [Long-term data on the regime and resources of surface waters in the USSR. T. 1. RSFSR. Vol. 7. River basins of the West coast of the White Sea]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 219 p.

Normativy kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya (Utv. Prikazom Minsel'khoza Rossii ot 13.12.2016 g. № 552) [Water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery value (Approved by the Order No. 552 of the Ministry of Agriculture of Russia dated December 13, 2016)].

Potapova I. Yu. Biogenne elementy i organicheskoe veshchestvo v vode pribrezhnoi chasti Belogo morya [Biogenic elements and organic matter in the water of the coastal part of the White Sea]. *Organicheskoe veshchestvo i biogenne elementy vo vnutr. vodoemakh i morskikh vodakh*: Mat. V Vseross. simp. s mezhdunar. uchast. [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and sea waters: Proceed. V All-Russ. symp. with int. part.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. P. 274–276.

Radchenko I. G., Il'yash L. V., Shevchenko V. P. Letnii fitoplankton v marginal'nom fil'tre reki Kemi (Onezhskii zaliv Belogo morya) [Summer phytoplankton in the marginal filter of the Kem' River (Onega Bay of the White Sea)]. *Geol. morei i okeanov: Mat. XX Mezhd. nauch. konf. (Shkoly) po morskoi geol.* [Geol. of the seas and oceans: Proceed. XX int. sci. conf. (school) on marine geol.]. Moscow: GEOS, 2013. P. 223–226.

Radchenko I. G., Il'yash L. V., Shevchenko V. P., Zdorovenov R. E., Novigatskii A. N., Politova N. V., Tolstikov A. V. Prostranstvennoe raspredelenie fitoplanktona v subarkticheskom estuarii (reka Kem', Beloe more) [Spatial distribution of phytoplankton in the subarctic estuary (Kem River, the White Sea)]. *Okeanologiya* [Oceanology]. Vol. 59, no. 3. 2019. P. 335–346. doi: 10.31857/S0030-1574593335-346

Sabylina A. V., Selivanova E. A. Khimicheskii sostav i kachestvo vody r. Kemi [Chemical composition and water quality of the Kem' River]. *Sovr. rezhim prirodnykh vod basseina r. Kem'* [The current regime of natural waters of the Kem' River basin]. Petrozavodsk, 1989. P. 165–180.

Zdorovenov R. E. Prilivnyi perenos primesi v pribrezhnykh raionakh Belogo morya [Tidal transfer of impurities in the coastal areas of the White Sea]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Murmansk, 2004. 24 p.

Gordeev V. V., Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S. The geochemical features of the river discharge to the White Sea. *Handb. Environ. Chem.* 2018. Vol. 81. P. 47–81. doi: 10.1007/698_2018_329

Shevchenko V. P., Alexeeva T. N., Filippov A. S., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Politova N. V., Rat'kova T. N., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Platonov A. V., Nöthig E. M., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' river estuary, White Sea (Russia). *HESS.* 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66.

Zyryanov V. N., Chebanova M. K., Filatov N. N. Seawater intrusion into river mouths. *Water Resources.* 2015. Vol. 42, no. 5. P. 616–626. doi: 10.7868/S032105961505020X

Received February 06, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Толстик Алексей Владимирович

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

Галахина Наталия Евгеньевна

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

Здоровеннов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаб. гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Tolstikov, Aleksey

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

Galakhina, Natalia

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

Zdorovenov, Roman

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

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.535.8:556.114

ДИНАМИКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА (2000–2018 гг.)

Г. Т. Фрумин^{1,2}, Н. А. Малышева¹

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

² *Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрена динамика качества воды Псковского озера за период 2000–2018 гг. Для оценки качества воды использован новый эколого-токсикологический подход к комплексной оценке загрязненности поверхностных вод, базирующийся на величинах рисков летальных исходов при воздействии загрязняющих веществ на дафний в широком диапазоне варьирования концентраций (риск комбинированного воздействия). Разработанный подход был применен для межгодовой оценки загрязненности озера неорганическими и органическими вредными веществами. Установлен «заметный отрицательный» тренд величин рисков комбинированного действия совокупности загрязняющих веществ и, соответственно, качества воды Псковского озера, что свидетельствует об уменьшении концентраций загрязняющих веществ с 2000 по 2018 г.

Ключевые слова: математические модели; эколого-токсикологическая оценка; дафнии.

G. T. Frumin, N. A. Malysheva. WATER QUALITY CHANGES IN LAKE PSKOVSKOE (2000–2018)

Changes in the water quality of Lake Pskovskoe in 2000–2018 are considered. The water quality assessment employed a new ecotoxicological approach to comprehensive assessment of surface water pollution based on the risk of death from exposure to a wide range of concentrations (risk of combined exposure) in *Daphnia*. The new approach was applied to assess the among-year variation of the pollution of the lake with inorganic and organic harmful substances. A noticeable “negative trend” was detected in the risk posed by a combined action of pollutants and, hence in the water quality of Lake Pskovskoe, indicating a decrease in the concentration of pollutants from 2000 to 2018.

Keywords: mathematical models; ecotoxicological assessment; *Daphnia*.

Введение

В настоящее время известно более 20 методов комплексной оценки загрязненности воды, отличающихся показателями (физическими, химическими, бактериологическими и гидробиологическими), их количеством (от 6 до 49), способом формализации данных и классификациями качества воды. Анализ современных оценок загрязненности поверхностных вод вредными веществами по гидрохимическим показателям выявил, что комплексная характеристика статуса поверхностных вод представляет собой весьма сложную и нерешенную до настоящего времени проблему.

Актуальность проведенного исследования определяется необходимостью совершенствования современных методов оценки загрязненности поверхностных вод суши, что является предметом оживленных дискуссий.

Псковское озеро (эст. *Pihkva järv*) – крупный пресноводный водоем, является южной составляющей Псковско-Чудского озера комплекса. С Чудским озером его соединяет Теплое озеро. Площадь Псковского озера 709 км² (20 % всего комплекса), наибольшая глубина 5,3 м, средняя глубина 3 м. Высота над уровнем моря 30 м. Длина с севера на юг около 40 км, средняя ширина около 18–19 км. Псковское озеро – водоем сильно проточный, вода в нем сменяется в среднем дважды в год. После 1945 года, когда Печорский район вернулся в состав Псковской области, большая часть береговой линии Псковского озера (в отличие от более приграничного Чудского), равно как и все его острова, контролируется Россией (рис. 1). Эстонии принадлежит небольшой (6 %) участок на северо-западе озера [Назаров, 1984; Кондратьев и др., 2010; Псковско-Чудское..., 2012; Лозовик, Фруммин, 2018]. Псковское озеро – одно из наиболее рыбопродуктивных озер Балтийского региона. В нем водятся рыбы более 30 видов: чудской сиг, снеток, ряпушка, лещ, плотва, елец, язь, жерех, густера, сырть, колюшка, сом, налим, угорь, щука, судак, окунь и др.

Псковское озеро испытывает значительную антропогенную нагрузку от точечных и диффузных источников. Первые связаны со сбросом сточных вод на его водосборе (города Псков, Гдов и другие населенные пункты). Вторые – диффузные за счет сельскохозяйственных объектов. Хотя сельскохозяйственное производство в Псковской области, как и в Эстонии, существенно снизилось, вынос биогенных элементов (БЭ) со стоком рек изменился мало, поскольку для восстановления сельхозугодий требуется значительное время.

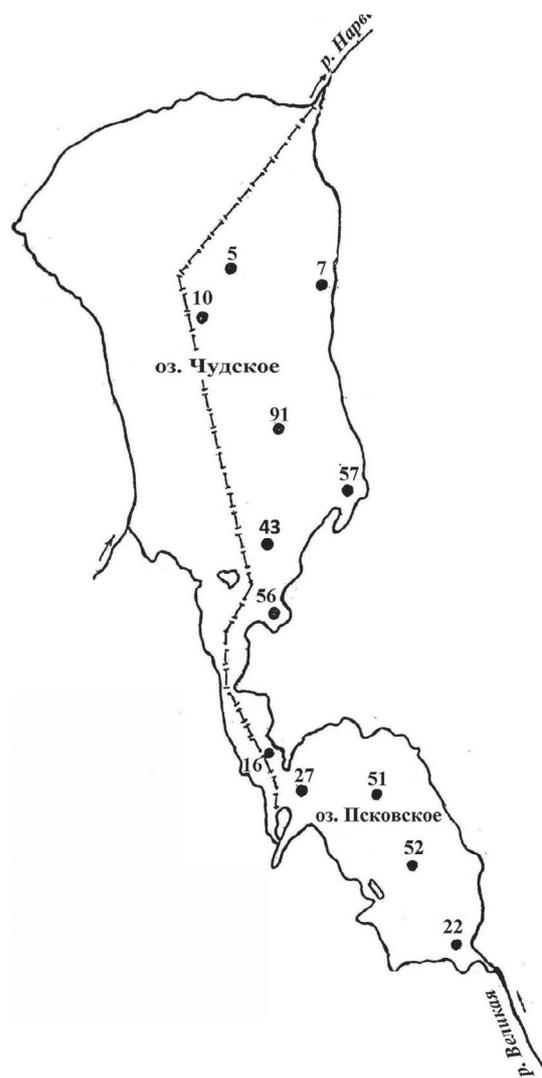


Рис. 1. Карта-схема Псковско-Чудского озера комплекса

Fig. 1. Map-scheme of the Pskov-Peipsi Lake Complex

Наряду с биогенным загрязнением озеро испытывает на себе значительное загрязнение тяжелыми металлами и детергентами, связанное с развитием промышленности на водосборе [Румянцев и др., 2015].

В связи с изложенным цель проведенного исследования заключалась в оценке динамики качества воды Псковского озера на основе нового эколого-токсикологического подхода, базирующегося на концепции риска.

Необходимость разработки нового подхода обусловлена следующими соображениями.

В Российской Федерации с 2002 г. степень загрязненности вод оценивается гидрохимическими показателями с использованием «удельного комбинаторного индекса загрязненности воды» (УКИЗВ) (РД 52.24.643–2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»). До

2002 г. в РФ использовали «индекс загрязненности воды» (ИЗВ), существенно отличающийся от УКИЗВ. Это обстоятельство не позволяет провести единообразную оценку качества воды рассматриваемого водного объекта, используя данные гидрохимического мониторинга за длительный период (например, с 2000 по 2018 г.).

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

Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует подходы к политике охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами и их охране. Природоохранной целью РДВ является достижение «хорошего статуса» всех грунтовых и поверхностных вод. РДВ содержит ряд общих требований по экологической защите поверхностных вод («хороший экологический статус») и общие минимальные требования по химическим параметрам («хороший химический статус»). К примеру, в Эстонии используют показатели биологические, физико-химические и гидроморфологические. Общая оценка состояния водного объекта дается на основании самого худшего показателя. Иными словами, отсутствие единой методики оценки загрязненности трансграничных вод сопредельных государств для оценки динамики качества воды существенно осложняет сотрудничество в сфере охраны трансграничных водных объектов [Фетисова, Фрумин, 2017].

Принятая в России система контроля и регламентирования качества водной среды рыбохозяйственных водоемов основана на установлении ПДК загрязняющих веществ в воде путем выполнения по определенной схеме экспериментов с гидробионтами – представителями разных уровней и звеньев водной экосистемы. ПДК – это экспериментально установленное и официально утвержденное максимально допустимое постоянное содержание в воде вредного

вещества и его метаболитов, при котором в водоеме не возникают последствия, снижающие его рыбохозяйственную ценность или затрудняющие его рыбохозяйственное использование.

Химический состав воды поверхностных водных объектов формируется в результате физических, химических и биологических процессов, протекающих на водосборной территории (включая выпадение осадков, массоперенос в зоне аэрации и в связанных с поверхностными подземными водами) и в самом водном объекте. Специфичность таких процессов определяется целым рядом природных факторов: климатические особенности, морфологические и литологические характеристики, типы почв, характер растительного покрова и др. Разнообразие перечисленных факторов на территории России обусловлено существенной вариабельностью химического состава поверхностных вод, что подтверждается многими исследованиями. Однако до сих пор при оценке качества воды водных объектов используются единые для всей территории страны нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Одним из следствий сложившейся ситуации является отсутствие объективной основы для установления целей и основных приоритетов при планировании водоохранной деятельности, что в свою очередь снижает эффективность водоохраных мероприятий и приводит к нерациональному расходованию средств [Беляев, 2017].

В последние десятилетия система ПДК, используемая для расчетов как ИЗВ, так и УКИЗВ, подвергается справедливой и аргументированной критике и наметилась тенденция к оценке состояния водных объектов не с точки зрения потребностей конкретного природопользователя, а с позиций сохранения структуры и функциональных особенностей гидрозкосистемы, так как «необходимо научиться прогнозировать отклик экосистемы в целом на совокупное внешнее воздействие, а не какого-либо ресурсного звена, обуславливающего практический интерес потребителя» [Дмитриев, Фрумин, 2004].

В литературных источниках можно найти обширный материал по разработанным системам классификации пресноводных водоемов, имеющим разную степень «законодательной» силы и использующим различные комплексы гидрохимических и гидробиологических показателей. Существующий подход к квантованию и выделению граничных значений числовых признаков, используемых для группировки водных объектов по классам качества, чаще всего достаточно произволен и основывается

Таблица 1. Математические модели для расчетов рисков летальных исходов при воздействии вредных веществ на дафний

Table 1. Mathematical models for calculating the risks of death from exposure to harmful substances in Daphnia

Вещество Substance	Модель Model	Вещество Substance	Модель Model
Cu ²⁺	Риск = 1 - exp(-25,103C ^{0,956}) Risk = 1 - exp(-25,103C ^{0,956})	Фенол Phenol	Риск = 1 - exp(-0,0154C ^{1,2638}) Risk = 1 - exp(-0,0154C ^{1,2638})
Pb ²⁺	Риск = 1 - exp(-0,2653C ^{1,1}) Risk = 1 - exp(-0,2653C ^{1,1})	НП NP	Риск = 1 - exp(-0,3851C ^{0,7124}) Risk = 1 - exp(-0,3851C ^{0,7124})
Cd ²⁺	Риск = 1 - exp(-1880409C ^{4,6135}) Risk = 1 - exp(-1880409C ^{4,6135})	NH ₄ ⁺	Риск = 1 - exp(-0,000000105C ^{5,5345}) Risk = 1 - exp(-0,000000105C ^{5,5345})
Zn ²⁺	Риск = 1 - exp(-2,02C ^{1,168}) Risk = 1 - exp(-2,02C ^{1,168})	NO ₂ ⁻	Риск = 1 - exp(-0,2861C ^{0,8125}) Risk = 1 - exp(-0,2861C ^{0,8125})
Fe ²⁺	Риск = 1 - exp(-0,017C ^{1,319}) Risk = 1 - exp(-0,017C ^{1,319})	NO ₃ ⁻	Риск = 1 - exp(-0,00186C ^{0,8103}) Risk = 1 - exp(-0,00186C ^{0,8103})

Примечание. НП – нефтепродукты, С – концентрация, мг/дм³.

Note. NP – oil products, C – concentration, mg/dm³.

ся на опыте исследователя. Традиционно выбирается некоторая шкала с числом градаций в пределах «магических» чисел от 3 до 7, например: «Очень чисто» – «Чисто» – «Не очень чисто» – «Не очень грязно» – «Грязно» – «Очень грязно» – «Катастрофически грязно». В дальнейшем, с использованием интуиции и квалификации разработчика, литературных данных, полученных «в начале прошлого века на одной английской реке», или общих соображений здравого смысла, каждой градации назначается конкретный диапазон значений из некоторого списка потенциально пригодных для этого показателей [Шитиков и др., 2003].

Материалы и методы

Во второй половине XX века в связи с необходимостью оценки токсичности природных и сточных вод, а также некоторых химических веществ во многих странах мира стали использовать биотестирование на *Daphnia magna* Straus. Дафнии широко применяются в биотестировании в таких странах мира, как США, Германия, Франция, Венгрия и др. Во многих из них дафния принята как стандартный тест-организм.

По данным литературы о токсичности загрязняющих веществ для дафний (медь, свинец, кадмий, цинк, железо, нефтепродукты, фенол, аммоний-ион, нитрит-ион, нитрат-ион) были построены линейно-экспоненциальные математические модели, связывающие величины рисков (вероятности) летальных исходов при воздействии этих веществ на дафний в широком диапазоне варьирования концентраций (табл. 1). Первичные данные о летальных и эффективных концентрациях, вызывающих эффекты у 16, 50 и 84 % подопытных тест-объектов, заимствованы из литературы [Красовский и др., 1991; Захарченко и др., 1996; Фрумин, Жаворонкова, 2003].

Учитывая, что риск является вероятностной величиной, для определения риска комбинированного действия в соответствии с правилом умножения вероятностей, где в качестве сомножителей выступают не риски, а значения, характеризующие вероятности их отсутствия, было применено следующее уравнение [Киселев, Фридман, 1997]:

$$\begin{aligned} \text{Риск}_{\text{комб}} &= 1 - (1 - \text{Риск}_1) (1 - \text{Риск}_2) \\ &\quad (1 - \text{Риск}_3) \dots (1 - \text{Риск}_n), \\ \text{Risk}_{\text{comb}} &= 1 - (1 - \text{Risk}_1) (1 - \text{Risk}_2) \\ &\quad (1 - \text{Risk}_3) \dots (1 - \text{Risk}_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где Риск_{комб} – риск комбинированного действия совокупности вредных веществ, Риск_i – риск воздействия индивидуальных вредных веществ.

Для классификации качества вод по уровням их загрязненности металлами была использована модель «разломанного стержня» [Мостеллер, 1975] (табл. 2).

Таблица 2. Классификация качества вод по величинам комбинированных рисков

Table 2. Classification of water quality by the values of combined risks

Качество воды Water quality	Риск комбинированный, Риск _{комб} Combined risk, Risk _{comb}	Класс качества Quality class
Очень хорошее Very good	0,00–0,04	I
Хорошее Good	0,04–0,09	II
Удовлетворительное Satisfactory	0,09–0,16	III
Плохое Bad	0,16–0,26	IV
Очень плохое Very bad	0,26–1,00	V

Таблица 3. Гидрохимические показатели российской акватории Псковского озера, мкг/дм³

Table 3. Hydrochemical indicators of the Russian water area of Lake Pskovskoe, µg/dm³

Год Year	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Fe ²⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	НП* Oil products	Фенол Phenol
2000	5,8	9,7	1,3	230	220	17,0	350	50	-
2001	3,9	2,2	0,4	170	132	16,5	169	40	3
2002	3,0	2,0	0,5	130	264	16,5	78	90	4,1
2003	5,8	2,5	0,39	118	598	16,5	91	47	3
2004	6,6	2,6	0,9	266	1056	16,5	62	60	2,1
2005	5,2	3,6	0,6	264	1012	19,8	96	112	1,2
2006	4,1	2,5	0,7	290	660	16,5	65	60	1,2
2007	10,3	1,8	0,4	160	968	19,8	39	130	2,9
2008	12,4	1,7	0,4	160	968	16,5	91	70	3,5
2009	5,1	2,3	0,4	250	792	19,8	26	40	1,1
2010	5,8	9,7	1,3	230	744	19,8	26	50	-
2011	1,8	2,4	0,4	160	827	19,8	39	30	1,5
2012	2,5	1,5	0,4	130	1179	23,1	195	40	1,9
2013	1,6	6,1	0,5	40	1122	33,0	78	20	3,2
2014	2,2	1,9	0,15	90	876	19,8	208	50	1,6
2015	2,0	1,5	0,2	90	788	16,5	143	60	2,4
2016	3,1	1,7	0,23	108	880	22,1	81	29	1,1
2017	3,1	1,3	0,17	329	1562	19,8	87	31	0,9
2018	2,4	1,9	0,09	232	673	16,5	56	20	0,7

Результаты и обсуждение

Разработанный эколого-токсикологический подход, базирующийся на моделях, приведенных в табл. 1 и формуле 1, использован для оценки межгодовой загрязненности российской акватории Псковского озера с 2000 по 2018 г. Для расчетов применялись среднегодовые данные гидрохимического мониторинга, проведенного Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (табл. 3). Результаты расчетов риска комбинированного действия для дафний за указанный период представлены в табл. 4.

Как следует из данных, приведенных в табл. 4, качество воды российской акватории Псковского озера варьировало от «очень плохого» в 2007–2008 гг. до «удовлетворительного» в 2011–2018 гг. В наибольшей степени озеро загрязнено соединениями меди, нефтепродуктами и нитрит-ионами.

Дополнительно к вышеизложенному определен линейный тренд комбинированных рисков за период 2000–2018 гг. (рис. 2). Для оценки трендов использована шкала Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002].

Как следует из рис. 2, для Псковского озера выявлен «заметный отрицательный» тренд качества воды (согласно шкале Чеддока).

Таблица 4. Динамика загрязненности вод Псковского озера

Table 4. The dynamics of water pollution of Lake Pskovskoe

Год Year	Риск _{комб} Risk _{comb}	Качество воды Water quality
2000	0,22	Плохое Bad
2001	0,18	«
2002	0,17	«
2003	0,25	«
2004	0,26	«
2005	0,23	«
2006	0,18	«
2007	0,34	Очень плохое Very bad
2008	0,36	«
2009	0,20	Плохое Bad
2010	0,22	«
2011	0,10	Удовлетворительное Satisfactory
2012	0,13	«
2013	0,09	«
2014	0,12	«
2015	0,12	«
2016	0,14	«
2017	0,14	«
2018	0,11	«

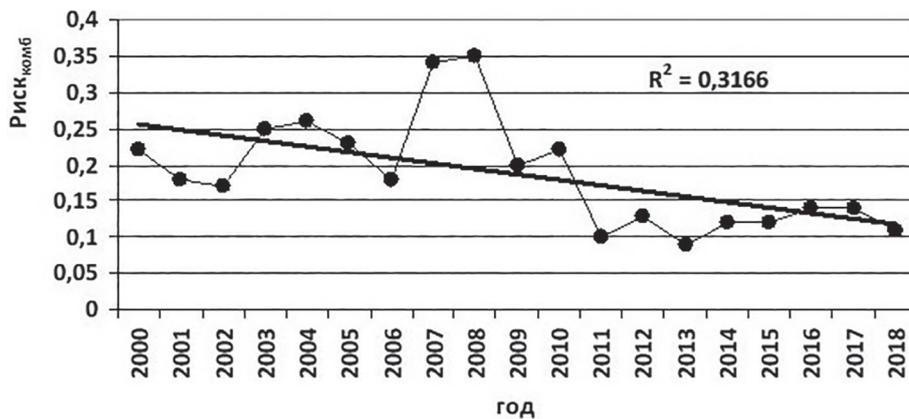


Рис. 2. Динамика качества воды Псковского озера

Fig. 2. Dynamics of water quality of Lake Pskovskoe

Выводы

1. За период 2000–2018 гг. качество воды российской акватории Псковского озера существенно улучшилось (от «плохого» и «очень плохого» в 2000–2010 гг. до «удовлетворительного» в 2011–2018 гг.).
2. Наибольший вклад в загрязненность Псковского озера вносят соединения меди, нефтепродукты и нитрит-ионы.
3. Научная новизна рассмотренного экологотоксикологического подхода заключается в совместном использовании гидрохимических и гидробиологических показателей, которые ранее использовались отдельно, в виде нового сочетания (новой математической модели).

Литература

Беляев С. Д. К вопросу учета пространственной дифференциации природной среды при планировании водоохранных мероприятий // Географический вестник. 2017. № 4(43). С. 81–96.

Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.

Захарченко М. П., Кошелев Н. Ф., Ромашов П. Г. Гигиеническая диагностика водной среды. СПб.: Наука, 1996. 247 с.

Киселев А. В., Фридман К. Б. Оценка риска здоровью. Подходы к использованию в медико-экологических исследованиях и практике управления качеством окружающей среды. СПб.: Международный институт оценки риска здоровью, 1997. 103 с.

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

Красовский Г. Н., Алексеева Т. В., Егорова Н. А., Жолдакова З. И. Биотестирование в гигиенической

оценке качества воды // Гигиена и санитария. 1991. № 9. С. 13–16.

Лозовик П. А., Фрумин Г. Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 3–10. doi: 10.17076/lim626

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

Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1975. 112 с.

Назаров Г. В. Чудско-Псковское озеро. Химический состав воды // Природные ресурсы больших озер СССР и вероятные их изменения. Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 110–114.

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

Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.

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

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

Фетисова Ю. А., Фрумин Г. Т. Динамика качества воды трансграничного Чудского озера // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 10. С. 38–44. doi: 10.17076/lim557

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

Фрумин Г. Т., Жаворонкова Е. И. Токсичность и риск воздействия металлов на гидробионтов // Экологическая химия. СПб.: Теза, 2003. Т. 12(2). С. 93–96.

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

Поступила в редакцию 24.09.2019

References

Belyaev S. D. K voprosu ucheta prostranstvennoi differentsiatsii prirodnoi sredy pri planirovani vodookhran-nykh meropriyatii [On the issue of taking into account the spatial differentiation of the natural environment when planning water conservation measures]. *Geograficheski vestnik* [Geographical Bull.]. 2017. No. 4(43). P. 81–96.

Dmitriev V. V., Frumin G. T. Ekologicheskoe normirovanie i ustoichivost' prirodnykh system [Environmental load rationing and sustainability of natural systems]. St. Petersburg: Nauka, 2004. 294 p.

Fetisova Yu. A., Frumin G. T. Dinamika kachestva vody transgranichnogo Chudskogo ozera [Changes in the water quality of the transboundary Lake Peipus]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 10. P. 38–44. doi: 10.17076/lim557

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

Frumin G. T., Zhavoronkova E. I. Toksichnost' i risk vozdeistviya metallov na gidrobiontov [Toxicity and risk of aquatic organisms exposure to metals]. *Ekol. khim.* [Ecol. Chem.]. St. Petersburg: Teza, 2003. Vol. 12(2). P. 93–96.

Kiselev A. V., Fridman K. B. Otsenka riska zdorov'yu. Podkhody k ispol'zovaniyu v mediko-ekologicheskikh issledovaniyakh i praktike upravleniya kachestvom okruzhayushchei sredy [Health risk assessment. Approaches to use in environmental health research and environmental quality management practice]. St. Petersburg: Mezhdunarod. inst. otsenki riska zdorov'yu, 1997. 103 p.

Kondrat'ev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Ryabchenko V. A., Dvornikov A. Yu. Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor – vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera) [Modeling abiotic processes in the catchment – reservoir system (case of Lake Peipus)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 116 p.

Krasovskii G. N., Alekseeva T. V., Egorova N. A., Zholdakova Z. I. Biotestirovanie v gigienicheskoi otsenke kachestva vody [Biotesting in a hygienic assessment

of water quality]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 1991. No. 9. P. 13–16.

Lozovik P. A., Frumin G. T. Sovremennoe sostoyanie i dopustimye biogennye nagruzki na Pskovsko-Chudskoe ozero [Present-day state and permissible nutrient loadings on Lake Peipus]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 3–10. doi: 10.17076/lim626

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

Mosteller F. Pyat'desyat zanimatel'nykh veroyatnostnykh zadach s resheniyami [Fifty challenging problems in probability with solutions]. Moscow: Nauka, 1975. 112 p.

Nazarov G. V. Chudsko-Pskovskoe ozero. Khimicheskii sostav vody [Lake Peipus. Chemical composition of water]. *Prirod. resursy bol'shikh ozer SSSR i veroyatnye ikh izmeneniya* [Natural resources of big lakes of the USSR and their probable changes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. P. 110–114.

Pskovsko-Chudskoe ozero [Lake Peipus]. Ed. T. Timm, A. Raukas, Yu. Khaberman, A. Yaani. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 p.

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Ozero evropeiskoi chasti Rossii [Lakes of the European part of Russia]. St. Petersburg: LEMA, 2015. 392 p.

Rysbekov Yu. Kh. Transgranichnoe sotrudnichestvo na mezhdunarodnykh rekakh: problemy, opyt, prognozy ekspertov [Cross-border cooperation on international rivers: problems, experience, lessons, and expert forecast]. Ed. V. A. Dukhovnyi. Tashkent: NITs MKVK, 2009. 204 p.

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

Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.

Zakharchenko M. P., Koshelev N. F., Romashov P. G. Gigienicheskaya diagnostika vodnoi sredy [Hygienic diagnostics of water environment]. St. Petersburg: Nauka, 1996. 247 p.

Received September 24, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

профессор каф. геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, д. х. н., проф.
Российский государственный гидрометеорологический университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007

ведущий научный сотрудник каф. физической географии и природопользования факультета географии
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186
эл. почта: gfrumin@mail.ru
тел.: +79111274098

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru
tel.: +79111274098

Малышева Наталия Александровна

соискатель каф. геоэкологии, природопользования
и экологической безопасности
Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: 9560895@gmail.com
тел.: +79219560895

Malysheva, Natalia

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: 9560895@gmail.com
tel.: +79219560895

УДК 556.114.7:546.21:543.632.14

ЗНАЧЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БПК ДЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ (НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ДАНЫХ С РАЗНЫМИ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ПРОБАМИ ВОДЫ ИЗ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

А. В. Леонов¹, М. В. Зобкова²

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

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

Влияние разных вариантов составления интегральных проб на кинетику биохимического потребления кислорода (БПК) исследовано в длительных экспериментах (до 84–126 сут) на пробах воды, отобранных в центральном глубоководном районе Онежского озера. В этой серии выполнено 32 эксперимента одновременно при 10 и 20 °С в разные сезоны 2012–2017 гг. Использовано пять вариантов отбора проб из разных горизонтов: поверхностного, придонного, с разных глубин толщи воды, из фотического и глубинного слоев. Всего с зимней водой проведено два, с летней – три, с осенней – четыре, а с весенней – семь экспериментов. Наиболее репрезентативны для изучения БПК в длительных опытах пробы, составленные из воды с глубины 0,5–1,0 м или разных горизонтов фотического слоя. Развитие БПК в экспериментах при каждом варианте получения интегральных проб отражено соответствующим кинетическим уравнением, параметры которого используются для характеристики особенностей окисления компонентов органического вещества, имеющегося в исследуемой воде и трансформируемого в длительном БПК-эксперименте. Проведен анализ полученных кинетических параметров БПК в зависимости от факторов, определяющих итоговое окисление компонентов органического вещества. Закономерности формирования типа развития БПК определяются условиями получения/составления интегральной пробы воды и характеризуются средними значениями содержащегося в воде органического вещества, оцениваемого аналитически или по эмпирическим уравнениям, а также температурой экспозиции проб воды в эксперименте. Обобщение полученной информации показало, что в весенней воде значения кинетических параметров БПК в целом ниже в сравнении с полученными для других сезонов. Это связано с тем, что потенциал окисления компонентов органического вещества в весенней воде выше в сравнении с другими сезонами.

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

**A. V. Leonov, M. V. Zobkova. BOD KINETIC PARAMETER VALUES FROM
LONG-TERM EXPERIMENTS (WITH DIFFERENT INTEGRATED WATER
SAMPLES FROM THE CENTRAL PART OF LAKE ONEGO)**

The effect of different variants of compiling integrated samples for biochemical oxygen demand (BOD) kinetics was studied in long-term experiments (up to 84–126 days) with

water samples taken from the central deep-water region of Lake Onego. It was a series of 32 experiments carried out simultaneously at 10 and 20 °C in different seasons of 2012–2017. Five sampling variants were employed with different horizon combinations: near surface, near bottom, from different depths in the water column, from the photic and profundal layers. Two experiments were performed with winter water, three with summer water, four with autumn water, and seven experiments with spring water. The most representative sample for studying BOD in long-term experiments is an sample composed of water from different horizons of the photic layer (0.5–13 m). For each variant of integrated sample composition, BOD development in the experiments was modeled by a corresponding kinetic equation whose parameters represented the oxidation characteristics of components of the organic matter present in the water and transformed in the long-term BOD experiment. The resultant kinetic parameters of BOD were analyzed in relation to the factors determining the final oxidation of the organic matter components. The patterns in which the type of BOD development is formed depend on the integrated water sample collection/compilation conditions and are characterized by the average values of the organic matter contained in the water, estimated either analytically or from empirical equations, as well as by the temperature of exposure of water samples in the experiment. Synthesis of the resultant information showed that the values of BOD kinetic parameters were generally lower in spring water taken from the central part of Lake Onego as compared with other seasons, since the oxidation potential of organic matter components in spring water is higher.

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

Введение

В современных гидрохимических и экологических исследованиях БПК-тест используется в основном для ориентировочной оценки качества водных ресурсов по измеренным значениям биохимического потребления кислорода (БПК) за 5 суток (БПК₅). Однако многими специалистами признана неопределенность и малая информативность показателя БПК₅ для оценки современного состояния водоемов и в целом качества водных ресурсов. Между тем анализ ранее опубликованных результатов по БПК показывает, что эксперименты по кинетике процесса дают полезную информацию при изучении закономерностей окисления органических веществ (ОВ) в природных водах. Примерами служат оцененные значения кинетических параметров для разных типов БПК-кривых при обобщении данных долгосрочных экспериментов с пробами морских и океанических вод [Леонов, 1977], а также результатов исследования особенностей разложения ОВ в водах Ладожского озера (в 30-суточных экспериментах в 1976–1979 гг.) [Трегубова, Кулиш, 1982], Можайского водохранилища (в двух сериях краткосрочных, продолжительностью до 5–10 сут, опытов по БПК в 1984 г.) [Леонов, Бердавецва, 1986, 1990; Леонов и др., 1991], Рыбинского водохранилища (1987–1988 гг., продолжительность 30–47 сут) [Бикбулатов, Бикбулатова, 1993] и данных, полученных при исследовании Нарочанских озер (1979–1980 гг., продолжительность 20–25 сут) [Ostapenia et al., 2009].

Исследования 2012–2017 гг. разнообразных по состоянию и трофическому статусу водоемов Карелии ставили своей целью получение информации по долгосрочной кинетике БПК и по содержанию компонентов ОВ в этих водоемах, чтобы на основе совместных показателей характеризовать качество воды в природных водных объектах. На первом этапе этих исследований проведено около 230 экспериментов одновременно при 10 и 20 °C с водой из более 30 разных водоемов Карелии. Выявленное в этих экспериментах разнообразие типов БПК-кривых связано с присутствием в воде разных форм ОВ, а также с различным антропогенным воздействием на природные водоемы (например, сбросом жидких хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод непосредственно в водные объекты) [Леонов, Зобкова, 2019]. Второй этап исследований был связан с обработкой всей серии экспериментов (методика обработки БПК-кривых приведена в [Леонов и др., 2018]) и с получением количественной информации – значений кинетических уравнений и параметров БПК для всей серии выполненных экспериментов. По значениям этих параметров могут быть охарактеризованы условия окисления в различных по концентрациям и составу компонентов ОВ водах разнотипных водоемов Карелии. Таким образом, второй этап исследований – сравнение и анализ типов экспериментальных кривых БПК, а третий этап – детальное сравнение значений параметров БПК, получаемых при обработке БПК-кривых для разных водоемов.

В настоящее время идет третий этап исследований, суть которого в анализе значений и изменений кинетических параметров БПК во взаимосвязи с изменениями концентраций ОВ в исследованных водоемах Карелии. По сравнимым параметрам БПК для разных экспериментов определяются их характерные значения в зависимости от ряда факторов среды, которые могут влиять на кинетику процесса БПК и окисления ОВ. К таким главным факторам относятся:

– **характеристики самого водоема** – его особенности, морфометрия, трофический статус, состав компонентов, интенсивность естественных процессов образования ОВ в самом водоеме, тип донных отложений, степень антропогенного влияния, характерное качество воды;

– **сезон отбора проб воды** – определяет смену условий по возможному влиянию природных процессов регионального масштаба, подчеркивает особенности климата и разное влияние на характеристики качества воды в отдельные сезоны года;

– **условия компоновки интегральной пробы воды** для эксперимента – вода из разных горизонтов, из одного горизонта, из фотического или глубинного слоев может по-разному влиять на развитие БПК;

– **температурные условия проведения эксперимента** – должны выявить специфику развития процесса БПК и окисления имеющихся в исследуемой воде разных форм ОВ в зависимости от суммарного влияния всех действующих факторов.

В природной воде ОВ постоянно преобразуется в ходе различных внутриводоемных процессов, в результате чего биота обеспечивается необходимыми химическими веществами и энергией для жизнедеятельности. В зависимости от способности ОВ к разложению микроорганизмами оно подразделяется на легкоокисляемое (разлагается за период от нескольких часов до суток) и трудноокисляемое (разлагается значительно дольше). Первое – автохтонное ОВ, его компонентами являются углеводы, липиды, белки, образуемые в самом водоеме фитопланктоном, а второе – аллохтонное ОВ, поступающее в водоемы с водосборных территорий (представлено гумусовыми веществами) и со сточными водами. Данные по долгосрочным БПК-наблюдениям могут использоваться для классификации природных вод при установлении взаимосвязи с содержанием ОВ (или его компонентами) и в целом для характеристики качества воды.

Одна из задач первых экспериментов по БПК, начатых при исследовании водоемов

Карелии с 2012 г., состояла в получении наиболее репрезентативной интегральной пробы, которую можно рекомендовать для долгосрочного изучения БПК как одного из показателей содержания компонентов ОВ в изучаемой воде из разнотипных водоемов Карелии. Важно знать, как составить интегральную пробу воды из водоема, чтобы она была репрезентативна и служила основой долгосрочных работ по изучению развития БПК при наличии в воде компонентов ОВ. Такие исследования были проведены с водой из центральной части Онежского озера, и их результаты представлены в данной работе.

Объекты и методы исследования

Онежское озеро – второй по площади водоем Европы с водосбором в 66 300 км² и площадью зеркала 9720 км² [Швец, 1977]. В формировании его вод участвуют 6765 рек общей длиной 22741 км и 9516 озер общей площадью 13441 км². Средняя глубина озера 31 м, а наибольшая – 120 м [Онежское..., 2010], озеро относится к большим стратифицированным водоемам, его удельный водосбор составляет 5,5, а условный водообмен – 16 год⁻¹.

Онежское озеро расположено в зоне сочленения Балтийского кристаллического щита и Русской платформы, поэтому южная его часть имеет довольно плавную береговую линию и ровный рельеф дна с мощной толщей озерных отложений, а северная и центральная характеризуются очень сложным рельефом с большими перепадами глубин, обилием заливов, губ и островов [Экосистема..., 1990].

Формирование химического состава вод Онежского озера происходит в основном за счет речного стока с водосборной территории – он составляет 17,3 км³ (73 %) за многолетний период [Балаганский и др., 2015], при этом на реки Водлу, Шую, Суну и Андому приходится свыше 60 % всего речного притока [Sabylina et al., 2010]. Из озера вытекает р. Свирь, которая впадает в Ладожское озеро, являясь его основным притоком. Уровень воды в Онежском озере зарегулирован плотиной Верхне-Свирской ГЭС.

В зависимости от гидрологических, гидрохимических, гидробиологических показателей и степени антропогенного воздействия Онежское озеро можно подразделить на отдельные районы. Центральная его часть меньше других районов подвержена изменчивости: она относительно изолирована от загрязненных губ, имеет большой объем водной массы, который перемешивается дважды в год, и кроме того,



Рис. 1. Карта-схема отбора проб в центральном плесе Онежского озера в 2012–2017 гг.

Fig. 1. Sampling map in the central part of Lake Onego in 2012–2017

сохраняет олиготрофный характер за счет дефицита Р, сдерживающего развитие фитопланктона [Сабылина, Рыжаков, 2007]. Акватория Центрального Онега отличается низкими температурами воды (средняя 7–8 °С), глубоководностью (средняя глубина 35,1 м) и высокой прозрачностью. Среднее многолетнее содержание ОВ в этом районе озера составляет 6,2 мг С/л [Сабылина, 2015].

Бассейн Онежского озера характеризуется неравномерным распределением источников

загрязнения, основные из которых расположены в северной его части. Крупными источниками загрязнения служат большие промцентры (города Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск).

В текущем исследовании использованы данные по 32 долгосрочным кинетическим БПК-экспериментам с водой из центрального плеса Онежского озера (станции С1 и С3) за различные сезоны в период 2012–2017 гг. (рис. 1).

Изучение БПК в водных объектах, как правило, проводится с использованием так назы-

Таблица 1. Схема отбора проб воды в сериях опытов из центрального плеса Онежского озера в различные гидрологические сезоны 2012–2017 гг.

Table 1. Plan of the water sampling in a series of experiments from the central part of Lake Onego in different hydrological seasons of 2012–2017

Серия опытов Series of experiments	Станция (глубина, м) Station (depth, m)	Сезон, год Season, year	Тип пробы (горизонт, м) Sample type (horizon, m)
1	С1 (57,0)	весна, 2012 spring, 2012	поверхностный (1,0) surface
			придонный (56,0) bottom
2	С1 (62,0)	зима, 2013 winter, 2013	интегральная (1,0 + 30,0 + 60,0) integral
	С1 (62,0)	весна, 2013 spring, 2013	поверхностный (1,0) surface
	С1 (62,0)	лето, 2013 summer, 2013	интегральная (1,0 + 33,0 + 63,0) integral
	С1 (62,0)	осень, 2013 autumn, 2013	интегральная (1,0 + 24,0 + 57,0) integral
3	С1 (64,0)	весна, 2014 spring, 2014	интегральная – фотический слой (0,5 + 1,7 + 3,4 + 5,1 + 6,8 + 9,5 + 10,2 + 12,0) integral – photic layer
			интегральная – глубинные слои (12,0 + 20,0 + 28,0 + 36,0 + 44,0 + 52,0 + 60,0) integral – deep layer
4	С1 (62,0)	лето, 2014 summer, 2014	интегральная – фотический слой (0,5 + 5,0 + 10,0 + 15,0) integral – photic layer
			интегральная – глубинные слои (15,0 + 30,0 + 45,0 + 65,0) integral – deep layer
	С1 (57,0)	осень, 2014 autumn, 2014	интегральная – фотический слой (0,5 + 3,5 + 7,0 + 10,0 + 13,5) integral – photic layer
			интегральная – глубинные слои (13,5 + 25,0 + 42,0 + 55,0) integral – deep layer
5	С3 (46,5)	весна, 2016 spring, 2016	интегральная (1,0 + 23,0 + 46,0) integral
	С1 (58,0)	осень, 2016 autumn, 2016	поверхностный (1,0) surface
	С3 (47,0)	зима, 2017 winter, 2017	поверхностный (1,0) surface
	С3 (45,5)	весна, 2017 spring, 2017	поверхностный (1,0) surface

ваемых интегральных проб воды. Такая проба составляется при отборе воды из разных горизонтов с целью, с одной стороны, уменьшить затраты времени и средств на такие исследования, а с другой, охватить больший объем водных масс изучаемого водного объекта и получить наиболее эффективный результат. В табл. 1 приводится информация о том, как в данном исследовании составлялись при отборе из водоема итоговые порции воды для экспериментов по БПК.

Для выяснения общих закономерностей потребления O_2 и соответствия кинетики БПК содержанию OB в природных водах проведены опыты продолжительностью до 84–126 сут. По-

сле доставки проб в лабораторию проводилась их аэрация в термостатах при соответствующих температурах для достижения равновесного содержания O_2 . Аэрация воды способствовала тому, что в кислородных склянках за время их экспозиции не образовывались пузырьки газа. Затем пробы разливались по склянкам и термостатировались в темноте при 10 и 20 °С. Для экспериментов использовались склянки из толстого стекла с притертой пробкой, объемом ~ 100 мл.

При отборе проб воды ставилась кислородная склянка для определения БПК за время транспортировки пробы в лабораторию. В дальнейшем эта величина добавлялась к зна-

чению полного БПК ($BPK_{полн}$). В опытных склянках O_2 фиксировался в начальный момент и далее на 3, 7, 14, 21, 35, 49, 70, 91 и 126-е сутки. Определение O_2 осуществлялось по Винклеру [РД 52.24.420–2006].

Для характеристики ОВ в пробах воды проводилось определение химического потребления кислорода (ХПК) [РД 52.24.421–2012]: в исходной воде перед началом эксперимента ($ХПК_0$), на 49-е сут ($ХПК_{49}$) и по его окончании ($ХПК_{126}$). В исходных пробах воды также было определено содержание органического углерода ($C_{орг}$) согласно методике [Зобков, Зобкова, 2015]. Для оценки значений ряда параметров ОВ использованы следующие эмпирические уравнения связей между основными его показателями: содержание лабильного С ($C_{лаб} = 0,3 \cdot [O_2]'$); содержание стабильного С ($C_{стаб} = C_{орг} - C_{лаб}$); содержание $C_{орг}$ в зависимости от общего содержания ОВ ($ОВ_{\Sigma}$) или его доли в стойкой фракции ($ОВ_{стаб}$) ($C_{орг}, мг С = 2,15 \cdot ОВ мг$) [Бульон, 1983]. В этих зависимостях использованы такие же обозначения параметров, как и в данной работе.

В долгосрочных экспериментах по БПК в зависимости от состава и свойств компонентов ОВ, содержащихся в исходных пробах воды, и от условий проведения теста обнаруживается, как правило, мультистадийное развитие БПК, описываемое уравнениями следующих типов [Леонов, 1977]:

экспоненциальный (E):

$$BPK = [O_2]''(1 - e^{-kt});$$

автокаталитический (A):

$$BPK = [B_{01}(e^{w_1t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1t} - 1));$$

экспоненциально-автокаталитический (EA):

$$BPK = [O_2]''(1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2t});$$

полиавтокаталитический (AA):

$$BPK = [B_{01}(e^{w_1t} - 1)] / (1 + \eta_{01}e^{w_1t}) + [B_{02}(e^{w_2t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2t});$$

экспоненциально-линейный (EL):

$$BPK = [O_2]''(1 - e^{-kt}) + \omega_s t;$$

автокаталитически-линейный (AL):

$$BPK = [B_{01}(e^{w_1t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1t} - 1)) + \omega_s t;$$

экспоненциально-автокаталитически-линейный (EAL):

$$BPK = [O_2]''(1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2t}) + \omega_s t;$$

полиавтокаталитически-линейный (AAL):

$$BPK = [B_{01}(e^{w_1t} - 1)] / (1 + \eta_{01}e^{w_1t}) + [B_{02}(e^{w_2t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2t}) + \omega_s t.$$

В этих уравнениях t – время, сутки; k – константа скорости БПК I-го порядка, $сут^{-1}$; k_k , w_1 , w_2 – константы скорости БПК II-го порядка, $(л \cdot мг^{-1} \cdot сут^{-1})$; v_1 , ω_s – соответственно скорости БПК на I-й стадии и на линейном участке БПК, $мг O_2 / (л \cdot сут)$; $[O_2]'$, $[O_2]''$ – предельные значения БПК соответственно на I-й и II-й стадиях, $мг O_2 / л$; B_{01} , B_{02} , h_{01} , h_{02} – параметры, определяемые при обработке БПК-кривых ($[B_{0i}] = k / k_k$; $[h_{0i}] = [B_{0i}] / [O_2]'$). Значения указанных кинетических параметров процесса БПК оцениваются при обработке экспериментальных БПК-кривых, и они служат количественными показателями для характеристики свойств исследуемых вод по отношению к окислению компонентов ОВ, имеющих в исследуемых водах.

Общий анализ всей информации должен упорядочить весь спектр полученных данных о развитии БПК в конкретных условиях эксперимента и подойти к систематизации полученной информации для характеристики особенностей процесса в конкретных водных объектах и в целом в масштабах Карельского региона. Сравнение значений кинетических показателей БПК позволяет подойти к такой систематизации информации на завершающем этапе ее анализа. Развитие БПК может быть охарактеризовано на каждой стадии набором показателей. По этому набору показателей для каждого водоема могут быть оценены средние их значения, и по ним исследуемые водоемы могут быть подразделены на разные группы в зависимости от ряда факторов/причин, которые формируют тот или иной режим развития процессов окисления ОВ в воде изучаемого водоема. Это особенно важно для анализа данных длительных БПК-опытов.

Результаты и обсуждение

Информативность кинетических данных по БПК не вызывает сомнения [Лозовик, 2012]. Значения кинетических параметров БПК можно использовать для характеристики свойств компонентов ОВ, содержащихся в исследуемой воде: констант скорости (k , w_1 , w_2) – для характеристики общих условий окисления форм ОВ на рассматриваемой стадии процесса; значений предельного БПК ($[O_2]'$, $[O_2]''$, $\omega_s \cdot t$) – для сравнения потребления O_2 на окисление компонентов ОВ на рассматриваемой стадии или суммарно ($[O_2]'$ + $[O_2]''$ + $\omega_s \cdot t$) за весь период эксперимента; скоростей БПК на I-й и линей-

ной стадиях (v_1 и ω_s) – при общей оценке интенсивности потребления O_2 на разных этапах окисления форм ОВ в зависимости от исходного их состояния (лабильности и трансформированности при отборе пробы воды и во время эксперимента).

Вся группа исходных данных по БПК, полученных в экспериментах с водой из центрального плеса Онежского озера, при анализе результатов обработки экспериментальных БПК-кривых условно подразделена на пять серий (табл. 1), которые рассматриваются ниже.

На рис. 2–6 приведены БПК-кривые, построенные по кинетическим уравнениям в сравнении с экспериментальными данными при 10 и 20 °С. В табл. 2 приведены значения кинетических параметров БПК по всем анализируемым в статье экспериментам с водой из центральной части Онежского озера, выполненным при 10 и 20 °С. Судя по сравниваемым расчетным и экспериментальным значениям, БПК-уравнения достаточно подробно воспроизводят результаты за весь период экспериментов.

Серия 1: данные экспериментов с водой из поверхностного и придонного горизонтов (ст. С1, 2012 г., весна)

Развитие БПК в пробах воды из поверхностного (0,5 м) и придонного (56 м) горизонтов (табл. 1) показано на рис. 2. При 10 и 20 °С кинетика БПК в воде из горизонтов 0,5 и 56 м воспроизводится соответственно уравнениями AL- и EL-типа. Это основное отличие, выявленное в особенностях развития БПК в этих водах. Здесь, как и во многих других опытах, значения констант БПК при 20 °С выше значений, полученных при 10 °С.

При разных температурах в экспериментах выявлены небольшие отличия в значениях на I-й стадии ряда кинетических параметров БПК: при 20 и 10 °С в воде из поверхностного горизонта оцененные по уравнению А-типа значения w_1 составляют соответственно 0,418 и 0,390 (средняя 0,404) л·мг⁻¹·сут⁻¹, а из придонного вычисленные по уравнению Е-типа значения k равны 0,102 и 0,118 (0,110) сут⁻¹ (табл. 2). При 20 °С значения $[O_2]'$ в этих водах составляют 0,40 и 0,37 (среднее 0,385) мг O_2 /л, v_1 – 0,0140 и 0,0377 (0,0259), ω_s – 0,0108 и 0,0083 (0,0094) мг O_2 /(л·сут). При 10 °С близкими оказались значения $[O_2]'$ – 0,220 и 0,200 (0,210) мг O_2 /л. Таким образом, при 20 °С на I-й стадии большие скорости БПК (по Е-типу) отмечены в воде из придонного горизонта ($v_1 = 0,0377$ мг O_2 /(л·сут)), а в воде из по-

верхностного (по А-типу) эта скорость ниже ($v_1 = 0,0140$ мг O_2 /(л·сут)). Иная ситуация для L-стадии: скорость БПК в воде из поверхностного горизонта выше при 20 °С ($\omega_s = 0,0108$ мг O_2 /(л·сут)), а в воде из придонного она при 10 и 20 °С мало отличается (составляет соответственно 0,00207 и 0,00175 мг O_2 /(л·сут)) (табл. 2).

Указанные отличия в типах БПК-кривых и в значениях скоростных параметров БПК служат основанием для предположения о наличии в этот сезон в исследованной воде из поверхностного и придонного горизонтов данной акватории разных по свойствам компонентов ОВ, которые подвержены окислению на различных стадиях процесса.

Серия 2: данные экспериментов с интегральными пробами воды (ст. С1, 2013 г., зима, весна, лето, осень)

Исследования по кинетике БПК в 2013 г. выполнялись с пробами воды, отобранными в разные сезоны. Зимой, летом и осенью интегральные пробы воды взяты из горизонтов трех слоев – поверхностного (1 м), промежуточного (24–33 м) и придонного (57–63 м), а весной – только из поверхностного горизонта (1 м) (табл. 1). Развитие БПК в зимней воде воспроизведено при 10 и 20 °С уравнениями EA- и AA-типа, в весенней воде – EAL- и EA-типа, в летней воде – AL- и EL-типа и в осенней воде – EAL- и EL-типа соответственно.

Сравнение развития БПК при 10 и 20 °С в пробах в разные сезоны показывает существенные отличия по формам БПК-кривых в экспериментах с зимней и весенней водой и сходные по формам БПК-кривые – в летней и осенней воде (рис. 3). Весной в пробе, представленной только водой из поверхностного горизонта (1 м), I-я стадия БПК при 10 и 20 °С развивается без каких-либо значимых отличий, а летом и осенью такие отличия более выражены.

Можно отметить следующие особенности развития БПК в серии экспериментов, выполненных в 2013 г., которые связаны со значительными отличиями в типах БПК-кривых. Так, в зимней и весенней воде при 10 и 20 °С отмечены очень близкие (по Е-типу) значения $[O_2]'$ на I-й стадии (в диапазоне 0,83–0,94 мг O_2 /л). В весенней воде близки для I-й стадии (по Е-типу) значения $[O_2]'$ (0,89 и 0,83 мг O_2 /л) и для II-й стадии (по А-типу) $[O_2]''$ (0,83 и 1,04 мг O_2 /л) при разных температурах. В летней и осенней воде эти значения были схожи отдельно при 10 °С (0,410 и 0,373 мг O_2 /л) и при 20 °С (0,667 и 0,650 мг O_2 /л). Близкие

Таблица 2. Значения кинетических параметров при 10 и 20 °С для разных БПК-кривых

Table 2. Kinetic parameter values at 10 and 20 °C for different BOD-curves

Год, сезон, глубина отбора пробы, рисунок Year, season, depth sampling, figure	20 °C	10 °C
2012 (B) 0,5 м Рис. 2, а 2012 (Sp) 0.5 m Fig. 2, а	AL: $[O_2]'$ = 0,40; w_1 = 0,418; B_{01} = 0,0836; v_1 = 0,014; ω_s = 0,0108 БПК ₈₄ : расч. – 1,31, эксп. – 1,31 BOD ₈₄ : calc. – 1.31, exp. – 1.31	AL: $[O_2]'$ = 0,22; w_1 = 0,390; B_{01} = 0,00438; v_1 = 3,76·10 ⁻⁴ ; ω_s = 0,0207 БПК ₈₄ : расч. – 0,36, эксп. – 0,35 BOD ₈₄ : calc. – 0.36, exp. – 0.35
2012 (B) 56 м Рис. 2, б 2012 (Sp) 56 m Fig. 2, б	EL: k = 0,102; $[O_2]'$ = 0,37; v_1 = 0,0377; ω_s = 0,00833 БПК ₈₄ : расч. – 1,07, эксп. – 1,05 BOD ₈₄ : calc. – 1.07, exp. – 1.05	EL: k = 0,118; $[O_2]'$ = 0,200; v_1 = 0,0236; ω_s = 0,00175 БПК ₈₄ : расч. – 0,35, эксп. – 0,27 (0,35) BOD ₈₄ : calc. – 0.35, exp. – 0.27 (0.35)
2013 (З) 1–60 м Рис. 3, а 2013 (W) 1–60 m Fig. 3, а	EA: k = 0,138; $[O_2]'$ = 0,94; v_1 = 0,130; w_2 = 0,147; B_{02} = 0,00196; $[O_2]''$ = 1,28 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,22, эксп. – 2,33 (2,22) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.22, exp. – 2.33 (2.22)	AA: $[O_2]'$ = 0,90; w_1 = 0,315; B_{01} = 0,0451; v_1 = 0,0128; w_2 = 0,226; B_{02} = 2,33·10 ⁻⁷ ; $[O_2]''$ = 1,387 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,29, эксп. – 2,33 (2,29) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.29, exp. – 2.33 (2.29)
2013 (B) 1 м Рис. 3, б 2013 (Sp) 1 m Fig. 3, б	EAL: k = 0,130; $[O_2]'$ = 0,89; v_1 = 0,116; w_2 = 0,0547; B_{02} = 0,00604; $[O_2]''$ = 0,83; ω_s = 0,0106 БПК ₉₁ : расч. – 2,66, эксп. – 2,77 (2,70) BOD ₉₁ : calc. – 2.66, exp. – 2.77 (2.70)	EA: k = 0,0931; $[O_2]'$ = 0,83; v_1 = 0,0773; w_2 = 0,120; B_{02} = 1,875·10 ⁻⁶ ; $[O_2]''$ = 1,04 БПК ₁₂₆ : расч. – 1,87, эксп. – 1,87 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.87, exp. – 1.87
2013 (Л) 1–63 м Рис. 3, в 2013 (Sm) 1–63 m Fig. 3, в	AL: $[O_2]'$ = 0,667; w_1 = 0,352; B_{01} = 0,0608; v_1 = 0,0143; ω_s = 0,0115 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,12, эксп. – 2,08 (2,12) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.12, exp. – 2.08 (2.12)	EL: k = 0,125; $[O_2]'$ = 0,41; v_1 = 0,0512; ω_s = 0,0059 БПК ₁₂₆ : расч. – 1,15, эксп. – 1,11 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.15, exp. – 1.11
2013 (O) 1–57 м Рис. 3, г 2013 (A) 1–57 m Fig. 3, г	EAL: k = 0,129; $[O_2]'$ = 0,65; v_1 = 0,0839; w_2 = 0,367; B_{02} = 4,73·10 ⁻⁶ ; $[O_2]''$ = 0,094; ω_s = 0,00935 БПК ₁₂₆ : расч. – 1,92, эксп. – 1,93 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.92, exp. – 1.93	EL: k = 0,203; $[O_2]'$ = 0,373; v_1 = 0,0757; ω_s = 0,00457 БПК ₁₂₆ : расч. – 0,95, эксп. – 0,96 BOD ₁₂₆ : calc. – 0.95, exp. – 0.96
2014 (B) 0,5–12 м Рис. 4, а 2014 (Sp) 0.5–12 m Fig. 4, а	AL: $[O_2]'$ = 1,03; w_1 = 0,191; B_{01} = 0,314; v_1 = 0,0618; ω_s = 0,00881 БПК ₉₁ : расч. – 1,83, эксп. – 1,83 BOD ₉₁ : calc. – 1.83, exp. – 1.83	AL: $[O_2]'$ = 0,91; w_1 = 0,249; B_{01} = 0,0627; v_1 = 0,0142; ω_s = 0,00595 БПК ₉₁ : расч. – 1,45, эксп. – 1,54 (1,45) BOD ₉₁ : calc. – 1.45, exp. – 1.54 (1.45)
2014 (B) 12–60 м Рис. 4, б 2014 (Sp) 12–60 m Fig. 4, б	AL: $[O_2]'$ = 0,78; w_1 = 0,315; B_{01} = 0,0434; v_1 = 0,0107; ω_s = 0,0111 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,18, эксп. – 2,46 (2,18) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.18, exp. – 2.46 (2.18)	AL: $[O_2]'$ = 0,78; w_1 = 0,132; B_{01} = 0,0803; v_1 = 0,00827; ω_s = 0,00845 БПК ₁₂₆ : расч. – 1,85, эксп. – 1,84 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.85, exp. – 1.84
2014 (Л) 0,5–15 м Рис. 5, а 2014 (Sm) 0.5–15 m Fig. 5, а	AAL: $[O_2]'$ = 0,853; w_1 = 0,701; B_{01} = 0,116; v_1 = 0,0694; w_2 = 0,0971; B_{02} = 0,175; $[O_2]''$ = 1,106; ω_s = 0,00943 БПК ₁₂₆ : расч. – 3,15, эксп. – 3,15 BOD ₁₂₆ : calc. – 3.15, exp. – 3.15	EL: k = 0,120; $[O_2]'$ = 0,686; v_1 = 0,0823; ω_s = 0,0135 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,39, эксп. – 2,30 BOD ₁₂₆ : calc. – 2.39, exp. – 2.30
2014 (Л) 15–65 м Рис. 5, б 2014 (Sm) 15–65 m Fig. 5, б	EL: k = 0,120; $[O_2]'$ = 0,67; v_1 = 0,0804; ω_s = 0,0127 БПК ₁₂₆ : расч. – 2,27, эксп. – 2,22 BOD ₁₂₆ : calc. – 2.27, exp. – 2.22	AAL: $[O_2]'$ = 0,44; w_1 = 0,427; B_{01} = 0,00823; v_1 = 0,00155; w_2 = 0,422; B_{02} = 8,55·10 ⁻⁷ ; $[O_2]''$ = 0,208; ω_s = 0,0102 БПК ₉₁ : расч. – 1,94, эксп. – 1,59 (1,91) BOD ₉₁ : calc. – 1.94, exp. – 1.59 (1.91)

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

Год, сезон, глубина отбора пробы, рисунок Year, season, depth sampling, figure	20 °C	10 °C
2014 (O) 0,5–13,5 м Рис. 5, в 2014 (A) 0.5–13.5 m Fig. 5, в	EL: $k = 0,150$; $[O_2]'$ = 0,53; $v_1 = 0,0795$; $\omega_s = 0,00956$ БПК ₁₂₆ : расч. – 1,74, эксп. – 1,73 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.74, exp. – 1.73	EL: $k = 0,180$; $[O_2]'$ = 0,15; $v_1 = 0,0270$; $\omega_s = 0,00629$ БПК ₁₂₆ : расч. – 0,94, эксп. – 0,94 BOD ₁₂₆ : calc. – 0.94, exp. – 0.94
2014 (O) 13,5–55 м Рис. 5, г 2014 (A) 0.5–13.5 m Fig. 5, в	EL: $k = 0,0634$; $[O_2]'$ = 1,08; $v_1 = 0,0685$; $\omega_s = 0,00675$ БПК ₁₂₆ : расч. – 1,93, эксп. – 1,93 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.93, exp. – 1.93	EL: $k = 0,140$; $[O_2]'$ = 0,17; $v_1 = 0,0238$; $\omega_s = 0,00571$ БПК ₁₂₆ : расч. – 0,89, эксп. – 0,89 BOD ₁₂₆ : calc. – 0.89, exp. – 0.89
2016 (B) 1–46 м Рис. 6, а 2016 (Sp) 1–46 m Fig. 6, а	AL: $[O_2]'$ = 0,31; $w1 = 1,405$; $B_{01} = 0,071$; $v_1 = 0,0309$; $\omega_s = 0,0143$ БПК ₁₂₆ : расч. – 2,11, эксп. – 1,94 (2,11) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.11, exp. – 1.94 (2.11)	AL: $[O_2]'$ = 0,70; $w1 = 0,341$; $B_{01} = 0,0403$; $v_1 = 0,00962$; $\omega_s = 0,00751$ БПК ₁₂₆ : расч. – 1,65, эксп. – 1,67 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.65, exp. – 1.67
2016 (O) 1 м Рис. 6, б 2016 (A) 1 м Fig. 6, б	AAL: $[O_2]'$ = 1,20; $w1 = 0,330$; $B_{01} = 0,773$; $v_1 = 0,306$; $w2 = 0,537$; $B_{02} = 4,12 \cdot 10^{-6}$; $[O_2]'' = 0,31$; $\omega_s = 0,0106$ БПК ₁₂₆ : расч. – 2,85, эксп. – 2,82 (2,85) BOD ₁₂₆ : calc. – 2.85, exp. – 2.82 (2.85)	AL: $[O_2]'$ = 0,26; $w1 = 0,403$; $B_{01} = 0,129$; $v_1 = 0,0135$; $\omega_s = 0,00829$ БПК ₁₂₆ : расч. – 1,30, эксп. – 1,30 BOD ₁₂₆ : calc. – 1.30, exp. – 1.30
2017 (З) 1 м Рис. 6, в 2017 (W) 1 м Fig. 6, в	EL: $k = 0,254$; $[O_2]'$ = 0,65; $v_1 = 0,165$; $\omega_s = 0,0161$ БПК ₄₉ : расч. – 1,44, эксп. 1,44 BOD ₄₉ : calc. – 1.44, exp. – 1.44	AL: $[O_2]'$ = 0,31; $w1 = 0,400$; $B_{01} = 0,00301$; $v_1 = 3,73 \cdot 10^{-4}$; $\omega_s = 0,0167$ БПК ₄₉ : расч. – 1,13, эксп. – 1,13 BOD ₄₉ : calc. – 1.13, exp. – 1.13
2017 (B) 1 м Рис. 6, г 2017 (Sp) 1 м Fig. 6, г	AL: $[O_2]'$ = 0,245; $w1 = 0,371$; $B_{01} = 0,0309$; $v_1 = 0,00281$; $\omega_s = 0,0126$ БПК ₁₂₆ : расч. – 1,83, эксп. – 1,86 (1,83) BOD ₁₂₆ : calc. – 1.83, exp. – 1.86 (1.83)	AL: $[O_2]'$ = 0,58; $w1 = 0,259$; $B_{01} = 0,0481$; $v_1 = 0,00722$; $\omega_s = 0,0047$ БПК ₉₁ : расч. – 1,01, эксп. – 1,01 BOD ₉₁ : calc. – 1.01, exp. – 1.01

Примечание. Цифра в круглых скобках – уточненное конечное экспериментальное значение БПК, учитываемое при обработке эксперимента. (З), (В), (Л), (О) – соответственно зима, весна, лето, осень.

Note. Number in parentheses is adjusted final experimental value of the BOD taken into account when processing the experiment. (W), (Sp), (Sm), (A) – respectively winter, spring, summer, autumn.

значения констант скорости БПК, k (в среднем $0,132 \text{ сут}^{-1}$) получены при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ зимой, весной и осенью, а при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ – в периоды открытой воды (в среднем $0,140 \text{ сут}^{-1}$), что также справедливо и для значений скорости БПК (средняя для зимней и весенней воды скорость v_1 при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ составила $0,123 \text{ мгO}_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$, а для весенней, летней и осенней воды при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ – $0,0681 \text{ мгO}_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$). Близкие скорости на I-й стадии БПК при 10 и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ отмечены только в осенней воде (соответственно $0,0839$ и $0,0757$, в среднем $0,0798 \text{ мгO}_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$).

Развитие II-й стадии БПК по А-типу фиксируется при 10 и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ в зимней и весенней воде, а в осенней – только при $20 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом значения $[O_2]''$ при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ зимой и весной были выше,

чем при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 2). Осенью в воде при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ значение $[O_2]''$ составляло $0,094 \text{ мгO}_2/\text{л}$, и оно более чем на порядок ниже среднего значения $[O_2]''$ для зимней и весенней воды при той же температуре ($1,06 \text{ мгO}_2/\text{л}$).

Следует отметить, что при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ оцененные значения скорости БПК, ω_s , на линейной стадии примерно близки в весенней, летней и осенней воде – они составляют соответственно $0,0106$, $0,0115$ и $0,00935$ (среднее $0,0105$) $\text{мгO}_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$. В экспериментах летом и осенью при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ скорости БПК на L-стадии были одного порядка ($0,0059$ и $0,00457$, в среднем $0,00523 \text{ мгO}_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$) (табл. 2). Зимой при 10 и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и весной при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ при наличии в воде растворенного O_2 не происходило его потребления на линей-

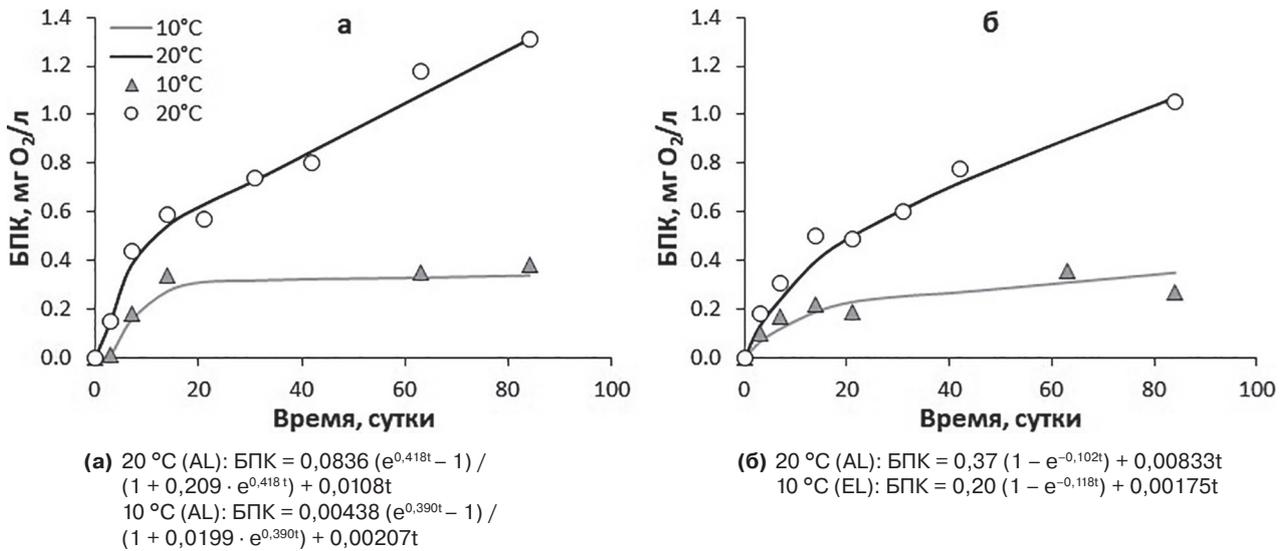


Рис. 2. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 10 и 20 °C (вода со ст. С1, 2012 г.): (а) – поверхностный и (б) – придонный горизонты.

Здесь и далее под рисунками – уравнения для разных БПК-кривых; обозначение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК – см. фрагм. а

Fig. 2. Comparison of BOD calculation curves and experimental data at 10 and 20 °C (water from C1, 2012): (a) – surface and (б) – bottom horizon.

Here in after below the figures – different BOD-curve equations; designation of BOD calculation curves and experimental data is the same as in fragment a

ной стадии после 49–70 сут. Можно предположить, что в зимней воде (смесь проб воды с 1, 24–33 и 57–63 м) содержатся компоненты ОВ, которые в условиях долгосрочного опыта не окисляются при 10 и 20 °C, а в весенней воде (с горизонта 1 м) – при 10 °C. Однако при 20 °C окисление весной в долгосрочных опытах имеет место, подобные случаи требуют дополнительных исследований.

Серия 3: данные экспериментов с интегральными пробами воды из фотического и глубинного слоев (ст. С1, 2014 г., весна)

Все эксперименты этой серии с интегральными пробами воды из фотического (0,5–12 м) и глубинного (12,0–60,0 м) слоев Онежского озера воспроизводятся уравнениями АL-типа (табл. 1, рис. 4).

В экспериментах при 20 °C с пробами весенней воды из фотического и глубинного слоев динамика БПК описывается (по А-типу) следующими значениями параметров: w_1 – 0,191 и 0,315 (среднее 0,253) л·мг⁻¹·сут⁻¹; B_{01} – 0,314 и 0,0434 мг/л; $[O_2]'$ – 1,03 и 0,78 (0,905) мг O₂/л; v_1 – 0,0618 и 0,0107; ω_s – 0,00881 и 0,0111 (0,010) мг O₂/(л·сут), а при 10 °C значения параметров составляют соответственно: w_1 – 0,249 и 0,132 (0,190) л·мг⁻¹·сут⁻¹; B_{01} – 0,0627 и 0,0803

(0,0715) мг/л; $[O_2]'$ – 0,91 и 0,78 (0,845) мг O₂/л; v_1 – 0,0142 и 0,00827 (0,0112); ω_s – 0,00595 и 0,00845 (0,0072) мг O₂/(л·сут) (табл. 2).

Таким образом, анализ полученных данных позволил установить, что значения кинетических параметров на I-й стадии при 10 и 20 °C в воде из фотического слоя выше, чем из глубинного (скорость БПК на I-й стадии v_1 при 20 °C превышала скорость при 10 °C в 4,3 раза, а в воде из глубинного слоя это превышение ниже ~ в 1,3 раза). Обратная зависимость установлена для значений скоростей БПК на линейной стадии (ω_s) – в воде из глубинного слоя значения ω_s при 10 и 20 °C были соответственно в 1,3 и 1,4 раза выше значений скорости в фотическом слое. Такое перераспределение скоростей БПК между стадиями (I-й и линейной) при разных температурах может быть результатом неполного вовлечения ОВ, имеющегося в исследуемой глубинной воде, в процесс окисления на I-й стадии при 10 °C и его более активного окисления на линейной стадии БПК.

Серия 4: данные экспериментов с интегральными пробами воды из фотического и глубинного слоев (ст. С1, 2014 г., лето, осень)

В этой серии проанализированы данные экспериментов с интегральными пробами воды

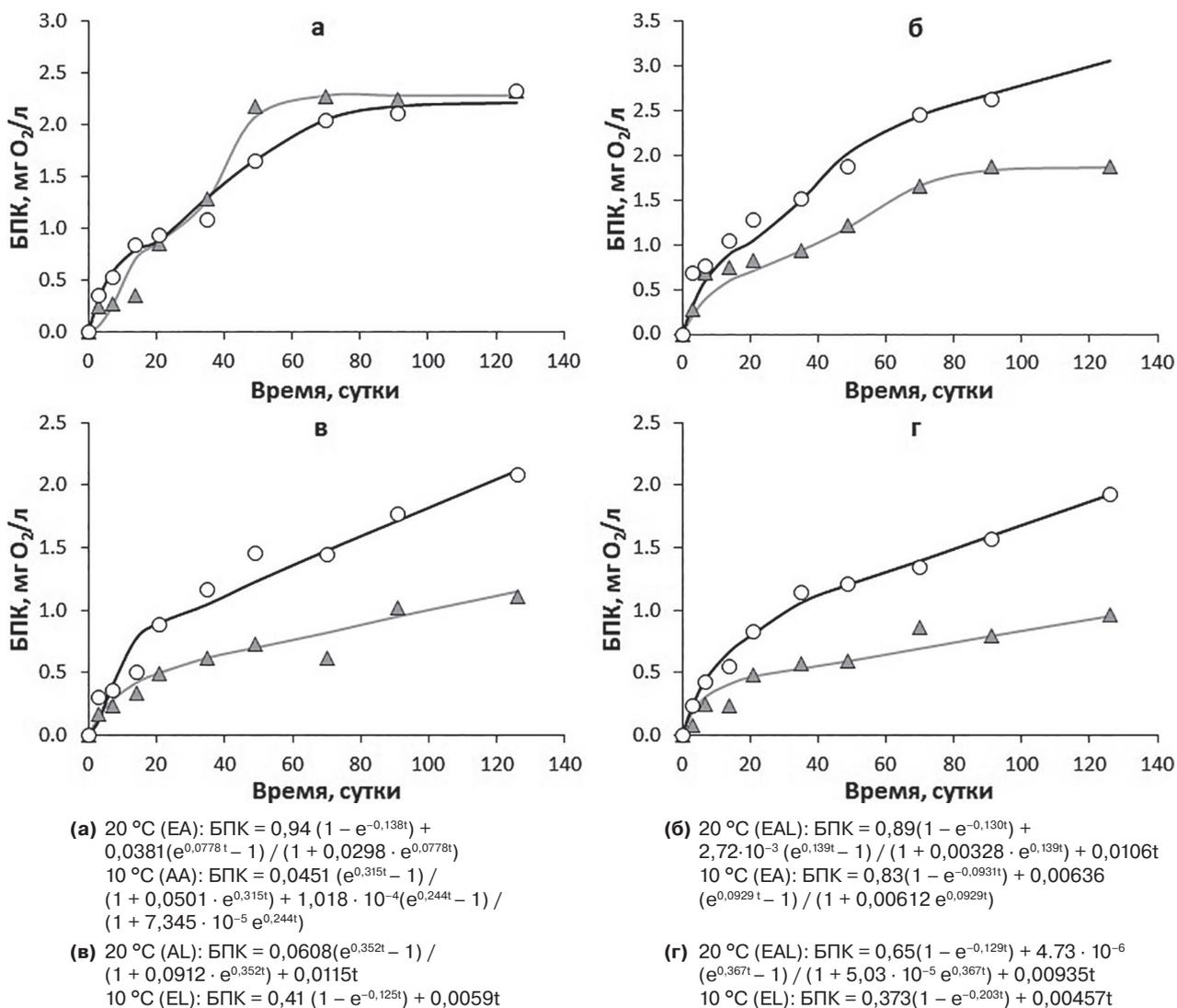


Рис. 3. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 10 и 20 °C (вода со ст. С1, 2013 г.): (а) – зима; (б) – весна, (в) – лето; (г) – осень.

Fig. 3. Comparison of BOD calculation curves and experimental data at 10 and 20 °C (water from C1, 2013): (a) – winter; (б) – spring; (в) – summer; (г) – autumn.

из фотического и глубинного слоев, отобранными летом (0,5–15,0 и 15,0–65,0 м) (рис. 5, а, б) и осенью (0,5–13,5 и 13,5–55,0 м) (рис. 5, в, г) (табл. 1 и 2). В эксперименте при 20 °C с летней водой из фотического и глубинного слоев кинетика БПК на I-й стадии описывается соответственно уравнениями А- и Е-типа, а при 10 °C отмечена обратная картина: развитие БПК по Е-типу характерно для воды из фотического слоя, по А-типу – из глубинного слоя.

Анализ кинетических параметров в воде из фотического и глубинного слоев при 20 °C (табл. 2) показал, что при отличиях типов кривых БПК близкими для них оказываются значения параметров $[O_2]'$ (соответственно 0,853 и 0,670, среднее 0,762 мг O_2 /л) и скоростей

процесса на I-й стадии, v_1 (0,0694 и 0,0804, среднее 0,0749 мг O_2 /(л·сут)). Также близки скорости потребления O_2 на линейной стадии, ω_s (соответственно равные 0,00943 и 0,0127, среднее – 0,0111 мг O_2 /(л·сут)).

Значения кинетических параметров БПК показывают, что при 10 °C в воде из фотического слоя развитие БПК на I-й стадии происходит активнее (выше значения параметров $[O_2]'$ и v_1), чем в воде из глубинного слоя. Это может означать, что в процессе окисления на I-й стадии в воде из разных слоев участвуют разные формы ОВ и что в воде из фотического слоя лабильность окисляющихся компонентов ОВ выше, чем компонентов ОВ в воде из глубинных слоев. Следует отметить, что отличия скоро-

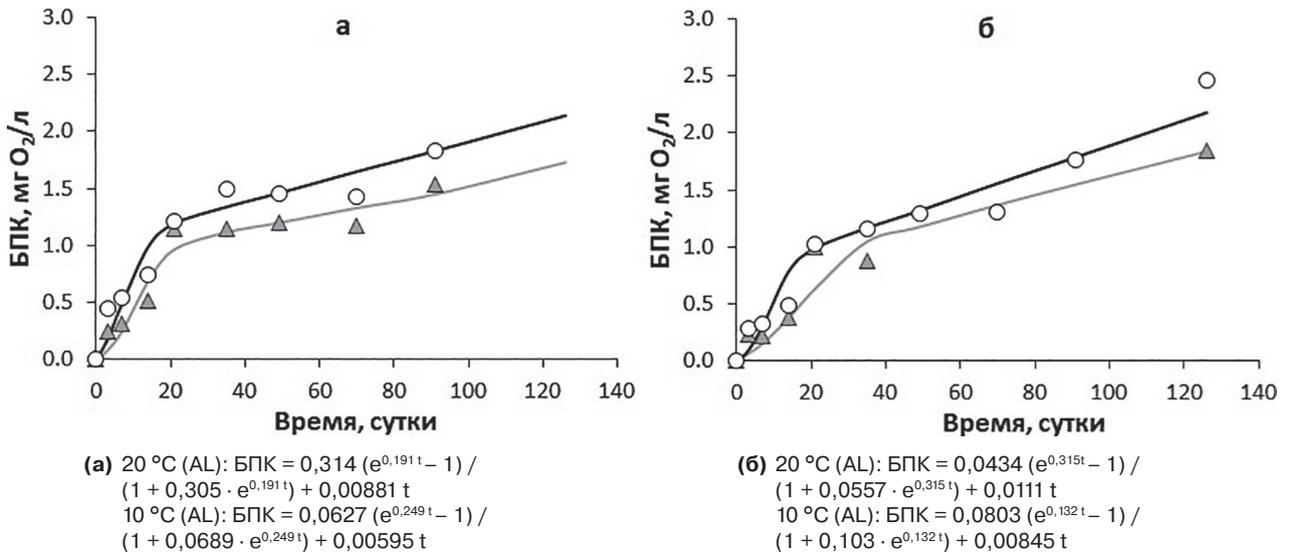


Рис. 4. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 10 и 20 °C (вода со ст. С1, весна 2014 г.): (а) – из фотического слоя, (б) – из глубинных слоев

Fig. 4. Comparison of BOD calculation curves and experimental data at 10 and 20 °C (water from C1, spring 2014): (а) – from the photic layer, (б) – from the deep layer

стей БПК на линейной стадии, ω_s , в воде из фотического и глубинного слоев не столь существенны – они составляют соответственно 0,0135 и 0,0102 (среднее 0,0119) мг O_2 /(л·сут). Важно и то, что в воде из разных слоев при 10 и 20 °C близки средние значения скоростей БПК на линейной стадии.

В осенней воде развитие БПК при 10 и 20 °C воспроизводится уравнением EL-типа. Значения параметров БПК при 20 °C в воде из разных слоев имеют некоторые отличия. Однако при значительном (почти в 2 раза) превышении параметра $[O_2]'$ в глубинной воде параметры скорости БПК в воде из фотического слоя выше (на I-й стадии, $v_1 = 0,0795$, и на линейной стадии, $\omega_s = 0,00956$ мг O_2 /(л·сут)) (табл. 2). При 10 °C для исследованных слоев не выявлено существенных отличий в значениях параметров БПК, что свидетельствует о выравнивании условий окисления компонентов ОВ при меньшей температуре в сравнении с режимом эксперимента при 20 °C. Можно предположить, что при 10 °C в развитии окислительных процессов роль фактора отбора пробы (конкретно из фотического или глубинного слоя) незначима в последующем развитии БПК и, очевидно, для окисления компонентов ОВ в осенний период.

Анализ значений параметров I-й стадии БПК при 20 °C во все периоды открытой воды из фотического слоя показал тенденцию снижения значения параметра $[O_2]'$ от весны к лету (в 1,2 раза) и далее к осени (в 1,6 раза), а также од-

новременного возрастания (на ~ 10 %) от весны к лету и осени скоростных параметров БПК – на I-й (v_1) и линейной (ω_s) стадиях (табл. 2). При 10 °C сохраняется тенденция, выявленная при 20 °C, по снижению значений $[O_2]'$ от весны к лету (в 1,3 раза) и далее к осени (в 4,6 раза), а возрастание скоростных параметров БПК отмечено только при переходе от весны к лету (v_1), осенью скоростные параметры снижаются из-за существенного уменьшения значения $[O_2]'$.

Для установления влияния температуры на кинетические параметры БПК были оценены отношения значений параметров при 20 °C к значениям при 10 °C. В результате установлено, что в экспериментах весной и осенью сравниваемые значения параметров при 20 °C выше значений при 10 °C ($[O_2]'$ – в 1,1–3,5 раза, v_1 – в 4,4–2,9, ω_s – в 1,5 раза). В летней воде превышение значения сохраняется только у $[O_2]'$ (оно выше при 20 °C в 1,2 раза), а значения скоростных параметров v_1 и ω_s сокращаются (соответственно до 0,8 и 0,7 раза).

Для вод глубинного слоя тенденции сезонных изменений значений параметров БПК отличаются. Значения $[O_2]'$ от весны к лету снижаются в 1,2, а от лета к осени возрастают в 1,6 раза. Скорость БПК v_1 на I-й стадии увеличивается от весны к лету в 7,5 раза и далее к осени немного снижается (в 0,8 раза). Такая же динамика наблюдается и для скорости на линейной стадии, ω_s , которая от весны к лету возрастает в 1,1, а от лета к осени падает в 1,9 раза.

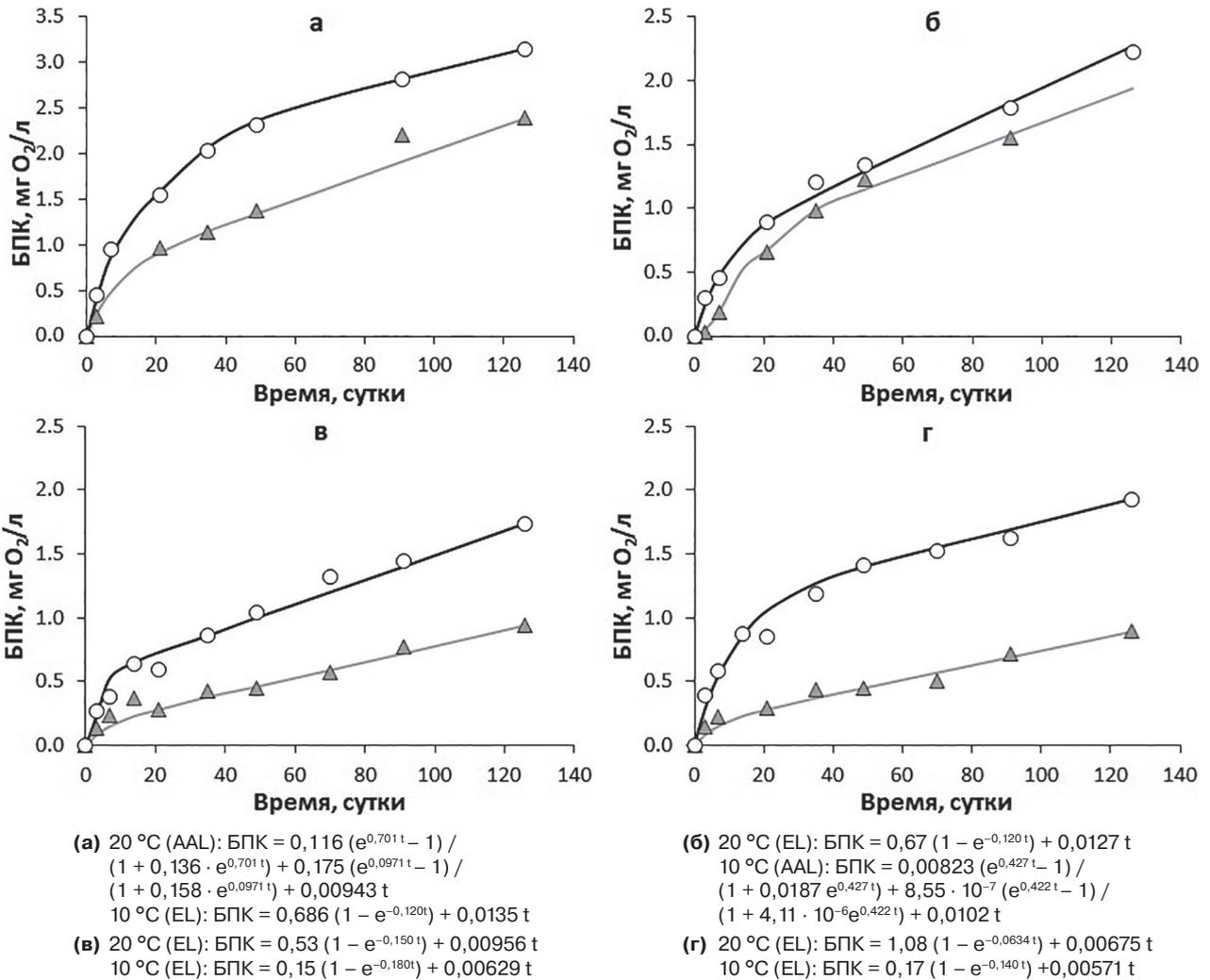


Рис. 5. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 10 и 20 °C (вода со ст. С1, 2014 г.) – лето: (а) – из фотического слоя (0,5–15 м), (б) – из глубинного слоя (15–65 м); осень: (в) – из фотического слоя (0,5–13,5 м), (г) – из глубинного слоя (13,5–55 м)

Fig. 5. Comparison of BOD calculation curves and experimental data at 10 and 20 °C (water from C1, 2014) – summer: (а) – from the photic layer (0.5–15 m), (б) – from the deep layer (15–65 m); and autumn: (в) – from the photic layer (0.5–13.5 m), (г) – from the deep layer (13.5–55 m)

Тенденции сезонных изменений параметров БПК отличаются: значения $[O_2]'$ от весны к лету и от лета к осени снижаются соответственно в 1,8 и 2,9 раза; v_1 – от весны к лету снижаются в 5,3, а к осени возрастают в 15,4 раза; значения ω_s от весны к лету возрастают в 1,2, а к осени снижаются в 1,8 раза.

Как и в ранее сравниваемых случаях, оцененные значения параметров для глубинного слоя при 20 °C выше значений при 10 °C, и только в весенней воде отмечено равенство при 10 и 20 °C значений $[O_2]'$ на I-й стадии БПК. Анализ других случаев показывает, что отношение значений $[O_2]'$ при 20 и 10 °C возрастает от весны к лету и далее к осени соответствен-

но от 1 до 1,5 и далее до 6,4 раза. Отношение значений скоростей БПК на I-й стадии при двух температурах сначала возрастает от 1,3 до 36,2 и затем снижается до 2,9 раза, а скорости на линейном участке ω_s показывают стабильное превышение в 1,3–1,2 раза.

Серия 5: данные экспериментов с интегральными пробами воды из разных горизонтов (ст. С3 и С1, 2016 г., весна, осень; 2017 г., зима, весна)

Для экспериментов интегральные пробы отбирали на ст. С3 от поверхности до дна весной 2016 г. и зимой 2017 г., а из поверхност-

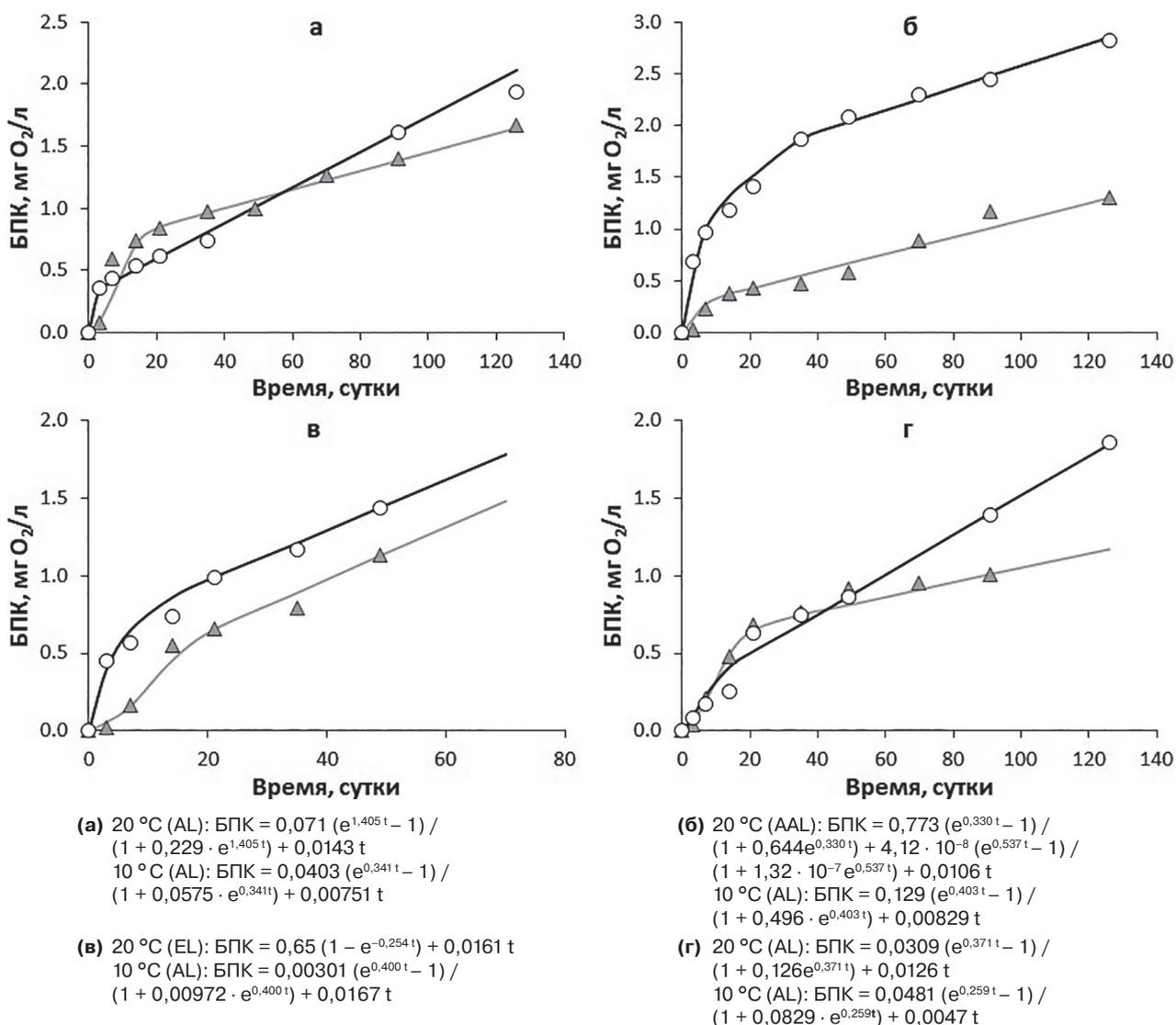


Рис. 6. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 10 и 20 °С (вода со ст. С1 и С3) – 2016 г.: (а) – весна, (б) – осень; 2017 г.: (в) – зима, (г) – весна

Fig. 6. Comparison of BOD calculation curves and experimental data at 10 and 20 °C (water from C1 and C3), 2016: (a) – spring, (б) – autumn; 2017: (в) – winter, (г) – spring

ного горизонта (1 м) – на ст. С1 осенью 2016 г. и на ст. С3 весной 2017 г. (табл. 1). Отличия в развитии БПК обнаруживаются в экспериментах при 20 °С – в осенней воде 2016 г. оно следует по AAL-уравнению, а в зимней воде 2017 г. – по EL-уравнению; в этих экспериментах при 10 °С, а также в весенней воде при 10 и 20 °С развитие БПК описывалось уравнениями AL-типа (рис. 6).

Значения кинетических параметров БПК при 10 и 20 °С выше в экспериментах 2016 г. с весенней водой. При этом пока не ясно, как объяснить, что при 20 °С средние предельные значения $[O_2]'$ оказываются в 2,3 раза ниже значений при 10 °С. По логике, должна быть обратная тенденция, как, например, отмечено для

значений ω_s , где средние скорости в 2,2 раза выше при 20 °С (табл. 2).

В интегральной пробе (весна 2016 г.) и в воде из горизонта 1 м (весна 2017 г.) кинетика БПК при 10 и 20 °С обнаруживает определенное сходство, что подтверждено одинаковым типом А-уравнения. В экспериментах при 20 °С с весенней водой в 2016 и 2017 гг. на I-й стадии БПК значения параметра $[O_2]'$ были близки между собой (0,31 и 0,245, среднее 0,278 мг O_2 /л), однако при 10 °С установлены значительно большие значения (соответственно 0,75 и 0,58 мг O_2 /л). Таким образом, значения $[O_2]'$ при 10 °С в среднем в 2,3 раза выше фиксируемых при 20 °С. С другой стороны, в этих экспериментах значения констант скоро-

сти I-й стадии, w_1 , были выше при 20 °С (1,405), чем при 10 °С (0,371 л·мг⁻¹·сут⁻¹) (табл. 2).

В осенней воде обнаруживаются наибольшие отличия в развитии БПК при 10 и 20 °С с учетом почти подобных типов уравнений для описания кинетики процесса. Сравнение значений параметров I-й стадии БПК показывает, что в этой серии получены экстремальные значения $[O_2]'$: наибольшее (1,2 мг O₂/л) при 20 °С и близкое к наименьшему (0,26 мг O₂/л) при 10 °С. Максимальная скорость БПК, v_1 , фиксируется в осенней воде из горизонта 1 м (0,306 мг O₂/(л·сут)), при 10 °С она значительно ниже и составляет 0,0135 мг O₂/(л·сут).

Зимой, как и осенью, в экспериментах при 10 °С кинетика БПК развивается по EL-типу, а при 20 °С – по AL-типу. Однако эти отличия не так сильно выражены, как в осенней воде. По-видимому, это связано с тем, что зимой лабильного ОВ в водоемах мало и его новообразование практически отсутствует. Поэтому значение $[O_2]'$ на I-й стадии при 20 °С в зимней воде в 1,9 раза ниже в сравнении с осенней, а при 10 °С значения $[O_2]'$ очень близки (см. табл. 2).

Оцененные в разных сезонных экспериментах значения скоростей БПК на линейной стадии показывают, что весной в интегральной пробе при 20 °С значение ω_s в 1,9 раза выше, чем при 10 °С (рис. 6, а), а в поверхностной воде – выше в 2,7 раза (рис. 6, г). Эти соотношения дают основание для предположения, что реакция ОВ, имеющегося в интегральной и поверхностной пробах воды, различна на разные температурные условия эксперимента. Также очевидно, что в интегральной пробе воды подобные свойства ОВ менее контрастны в сравнении со свойствами компонентов ОВ в воде из поверхностного слоя. Более высокое соотношение значений ω_s в весенней воде из поверхностного слоя должно быть как-то по-своему выражено, и оно может служить показателем отличий в концентрациях ОВ в испытываемых пробах воды. Отметим, что осенью и зимой в пробах из поверхностного слоя порядок соотношений значений ω_s при 20 и 10 °С был ниже и составил 1,30 (рис. 6, б) и 0,96 (рис. 6, в) соответственно.

Таким образом, значения ω_s в исследуемых водах и их соотношения можно применять для характеристики свойств компонентов ОВ, исходный состав которых меняется в природных условиях в разные сезоны, а в процессе длительных БПК-экспериментов подвержен окислительной трансформации и преобразованиям, которые определяются природными их свойствами и условиями проведения эксперимента.

Анализ особенностей развития БПК в весенних пробах воды (ст. С1 в 2012–2014 гг. и ст. С3 в 2016–2017 гг.)

Весна – наиболее важный период года, когда совокупность факторов среды перестраивается и оказывает существенное влияние на условия функционирования водной экосистемы. Важный действующий фактор – концентрация биогенных веществ (БВ) и ОВ весной повышены за счет накопления за зимний период, когда активность организмов понижена, а естественный круговорот веществ замедлен из-за неблагоприятных для роста биомасс условий среды обитания. Весенний прогрев вод поверхностного слоя активизирует развитие сообщества организмов, участвующих в трансформации БВ и ОВ, а также фитопланктона – основного продуцента автохтонного ОВ во внутренних водоемах. Также в этот период в большинстве озер содержание растворенного O₂ близко к насыщению, а при фотосинтезе фитопланктона может даже быть выше на 20–30 %. Весной в водоемы поступает наибольшее в году количество речного стока, с которым с водосбора привносятся значительные массы растворенных и взвешенных веществ, при этом в озерах резко возрастает запас БВ и аллохтонного ОВ и вследствие этого может существенно измениться соотношение стабильной и лабильной фракций ОВ.

Активная вертикальная циркуляция водных масс, охватывающая весной всю водную толщу от поверхности до дна, выравнивает вертикальное распределение компонентов в водной среде. Учитывая важность весеннего периода в перестройке гидроструктуры водоема и в формировании запасов ОВ в водной среде, акцент был сделан на изучении потенциальных условий развития потребления O₂ именно в весенней воде при разных режимах составления для экспериментов интегральных проб воды из разных горизонтов (табл. 1).

Сравнение расчетных (по уравнению А-типа) значений предельного потребления O₂ показало, что на I-й стадии в летней и осенней воде они в среднем равны 0,762 и 1,410 мг O₂/л, а вычисленных по Е-уравнению в зимней, летней и осенней воде – соответственно 0,795, 0,670 и 0,753 мг O₂/л. В весенней воде эти значения для А- и Е-типов БПК-кривых близки к минимальным значениям (соответственно 0,614 и 0,687 мг O₂/л). Значения константы скорости потребления O₂ в зимней, летней и осенней воде составили в среднем 0,196, 0,120 и 0,107 сут⁻¹, а в весенней воде отмечено значение k , близкое к минимальному (0,116 сут⁻¹).

Скорости потребления O_2 на линейной стадии мало отличаются в разные сезоны и характеризуются значениями 0,0109–0,0161 мг O_2 / (л·сут). Однако в значениях общего количества O_2 , потребляемого на линейной стадии, есть отличия: в итоге оно повышено в зимней и летней воде (соответственно 2,029 и 1,412 мг O_2 / (л·сут)) и ниже в весенней и осенней воде (соответственно 1,219 и 1,142 мг O_2 / (л·сут)).

В результате подробного исследования развития БПК в экспериментах с весенней (июньской) водой из центрального плеса Онежского озера для 2012–2017 гг. составлена серия БПК-кривых, которая характеризует различия в кинетике процесса в долгосрочных экспериментах в зависимости от сроков и горизонтов отбора проб воды, а также от условий их сохранения. В полученных экспериментальных БПК-кривых при 10 и 20 °С в весенней воде в разные годы есть различия, что видно по отличающимся типам БПК-кривых (табл. 2, рис. 2–6).

В указанных экспериментах установлены максимальные и минимальные значения кинетических параметров БПК. Наименьшие значения кинетических параметров БПК при 10 и 20 °С – $[O_2]'$ в пределах 0,20–0,31 мг O_2 /л, $v_1 = 3,76 \cdot 10^{-4}$ – 0,00722 и $\omega_s = 0,00175$ –0,00833 мг O_2 / (л·сут) – получены в экспериментах с интегральными пробами воды из разных слоев (от поверхности до дна, из поверхностного и глубинного горизонтов) в период 3–8 июня 2012, 2016 и 2017 гг. Наибольшие значения параметров БПК – $[O_2]'$ в пределах 0,83–1,03 мг O_2 /л; $v_1 = 0,0142$ –0,116 и $\omega_s = 0,00845$ –0,0143 мг O_2 / (л·сут) – отмечены в интегральных пробах воды, составленных из порций воды из фотического слоя или поверхностного горизонта (0,5–1 м), в экспериментах, выполненных в период 12–18 июня 2013 и 2014 гг. (табл. 1, 2).

Таким образом, оцененные минимальные и максимальные значения кинетических параметров БПК ($[O_2]'$, v_1 и ω_s) характеризуют особенности отбора воды при составлении для экспериментов интегральных проб, а даты проведения весенних экспериментов оказывают непосредственное влияние на итоговые результаты экспериментальных работ по БПК.

Характеристика содержания ОВ в исследуемых пробах воды

Наряду с проведением экспериментов по кинетике БПК в пробах воды проводилась оценка содержания ОВ – по аналитическим измерениям ($C_{орг}$, ПО, ХПК) и расчетам по эмпирическим взаимосвязям ($C_{лаб}$, $C_{стаб}$, OB_{Σ} , $OB_{стаб}$)

(табл. 3). Вода в центральной части Онежского озера относится к олиготрофному и олигогумусному типу, поэтому концентрация ОВ менялась слабо в течение всего периода наблюдений – 6,2–8,0 (в среднем 7,2) мг С/л.

Для весеннего периода большинство средних значений оцененных параметров, характеризующих содержание в исследуемых водах ОВ, оказываются в целом наименьшими или близкими к минимальным, наблюдаемым в другие сезоны. Так, концентрации $C_{орг}$ в зимней, летней и осенней воде составили в среднем 7,3; 7,6 и 7,1 мг С/л, а ХПК₀ – 18,4; 18,3 и 17,6 мг О/л соответственно. Содержание этих показателей в весенней воде оказалось наименьшим или близким к таковому ($C_{орг}$ – 7,0 мг С/л, ХПК₀ – 17,9 мг О/л).

Расчетные значения C лабильной и стабильной фракций ОВ составили соответственно в зимней воде 0,23 и 7,07, в летней воде – 0,22 и 7,41 и в осенней воде – 0,28 и 6,80 мг С/л. Содержание C в этих фракциях в весенней воде близко к минимальным значениям – соответственно 0,19 и 6,84 мг С/л. Оцененные значения суммарного содержания OB_{Σ} и в стабильной его фракции $OB_{стаб}$ составили соответственно в зимней воде 3,40 и 3,29, в летней воде – 3,55 и 3,45, в осенней воде – 3,29 и 3,16, а в весенней воде – 3,27 и 3,18 мг/л. Концентрации показателей в весенней и осенней воде часто близки к минимальным значениям.

На фоне всех перечисленных выше показателей, характеризующих в среднем сезонные изменения ОВ в воде из Онежского озера, обращаем внимание на повышенное в весенней воде значение $\Delta ХПК$ (разность между измеренными значениями ХПК₀ – ХПК₁₂₆). В зимней, летней и осенней воде эта разность составляет соответственно 3,5; 3,1 и 1,9 мг О/л, а в весенней воде она равна 5,3 мг О/л (то есть в 1,5–2,8 раза выше в сравнении с другими сезонами). Эта разность характеризует повышенный потенциал окисления компонентов ОВ в весенний период в сравнении с другими сезонами.

В первую декаду (3–8 июня) повышенные значения показателей содержания ОВ и, в частности, его стойкой фракции (ХПК, $C_{орг}$, $C_{стаб}$, OB_{Σ} , $OB_{стаб}$) наблюдались в воде из придонного горизонта, что объясняет невысокие скорости потребления O_2 на I-й стадии ($v_1 = 0,0377$ мг O_2 / (л·сут)) и общего БПК на линейной стадии ($\omega_s \cdot t = 0,700$ мг O_2 /л). В поверхностном горизонте и в воде из разных слоев водной толщи установлена обратная зависимость: повышены значения общего БПК ($\omega_s \cdot t = 1,59$ и 1,802 мг O_2 /л соответственно) и понижены значения показателей содержания ОВ.

Таблица 3. Показатели органического вещества при 20 °С в различные сезоны 2012–2017 гг.

Table 3. Organic matter concentrations at 20 °C in different seasons of 2012–2017

Сезон Season	Год (тип отбора проб) Year (sampling type)	Аналитические измерения Analytical measurements					Расчетные параметры ОВ Calculated characteristics			
		C_{opr} мг С/л TOC, mg/l	ПО, мг О/л COD_{Mn} mg O/l	ХПК ₀ COD_{Cr0}	ХПК ₄₉ COD_{Cr49}	ХПК ₁₂₆ COD_{Cr126}	C_{lab} C _{lab}	C_{stab} C _{stab}	OM_{Σ} OM _Σ	OM_{stab} OM _{stab}
				мг О/л mg O/l			мг С/л mg C/l		мг/л mg/l	
Зима Winter	2013 (4)	7,4	7,8	17,0	16,3	14,9	0,28	7,12	3,44	3,31
	2017 (1)	7,2	8,7	19,8	15,7*	14,9	0,18	7,02	3,35	3,26
Среднее Mean		7,3	8,3	18,4	16,0	14,9	0,23	7,07	3,40	3,29
Весна Spring	2012 (1)	6,8**	7,1	18,1	–	–	0,12	6,68	3,16	3,11
	2012 (5)	7,4**	7,1	19,6	–	–	0,11	7,29	3,44	3,39
	2013 (1)	7,2	8,2	16,0	13,9	13,4	0,27	6,93	3,35	3,26
	2014 (2)	7,3	8,0	17,7	–	11,2	0,31	6,99	3,40	3,25
	2014 (3)	7,0	7,7	21,7	–	13,3	0,23	6,77	3,26	3,15
	2016 (4)	6,7	6,5	16,2	–	–	0,24	6,46	3,12	3,01
2017 (1)	6,8	6,8	16,1	–	–	0,07	6,73	3,16	3,13	
Среднее Mean		7,0	7,3	17,9	–	12,6	0,19	6,84	3,27	3,18
Лето Summer	2013 (4)	7,5	7,6	17,6	14,8	11,0	0,20	7,30	3,49	3,40
	2014 (2)	7,4	6,6	18,0	17,5	16,4	0,26	7,14	3,44	3,32
	2014 (3)	8,0	6,6	19,2	18,6	18,2	0,20	7,80	3,72	3,63
Среднее Mean		7,6	6,9	18,3	17,0	15,2	0,22	7,41	3,55	3,45
Осень Autumn	2013 (4)	7,4	7,0	16,2	14,3	13,6	0,20	7,21	3,44	3,35
	2014 (2)	7,3	7,4	18,7	17,0	16,0	0,32	7,08	3,40	3,29
	2014 (3)	7,4	7,2	19,2	18,2	17,4	0,16	7,14	3,44	3,32
	2016 (1)	6,2	7,5	16,2	–	–	0,42	5,78	2,88	2,69
Среднее Mean		7,1	7,3	17,6	16,5	15,7	0,28	6,80	3,29	3,16

Примечание. Показатели ОВ – см. текст; ПО – перманганатная окисляемость. Тип отбора проб: (1) – из поверхностного горизонта (0,5 или 1 м); (2) – из фотического слоя (0,5/1,0–12,0/15,0 м); (3) – из глубинных слоев (12,0/15,0 – придонный горизонт); (4) – из разных горизонтов водной толщи; (5) – придонный горизонт (56 м); * – соответствует времени $t = 35$ сут; ** – оценено по эмпирическому уравнению $C_{opr} = 0,375$ ХПК [Скопинцев, 1950]. Прочерк означает отсутствие данных.

Note. COD_{Cr0} , COD_{Cr49} , COD_{Cr126} – chemical oxygen demand at 0, 49 and 126 days; COD_{Mn} – permanganate oxidizability; TOC – total organic carbon; C_{lab} – labile carbonate; C_{stab} – stable carbonate; OM_{Σ} – organic matter amount; OM_{stab} – stable organic matter. Sampling type: (1) – surface horizon (0.5 or 1.0 m); (2) – photic layer (0.5/1.0–12.0/15.0); (3) – bottom layer (12.0/15.0 – bottom horizon); (4) – different horizons; (5) – bottom horizon (56 m); * – correspond with time $t = 35$ days; ** – calculated by empirical equation $TOC = 0.375$ COD_{Cr} after [Skopintsev, 1950]. The dash is the absence of data.

Во вторую декаду (12–18 июня), в отличие от первой, в фотическом слое увеличиваются все показатели БПК (k , v_1 , $[O_2]'$ и $\omega_s \cdot t$), при этом фиксируются повышенные концентрации C_{opr} (7,3 мг С/л) и его лабильной фракции C_{lab} (0,31 мг С/л). В глубинных слоях также выявлены повышенные значения общего БПК ($\omega_s \cdot t = 1,399$ мг O_2 /л).

Очевидно, есть определенная взаимосвязь распределения во времени фиксируемых в экспериментах значений параметров БПК и измеренных показателей ОВ с известным классическим распределением температуры в центральной части озера: в первой декаде июня из-за высокого вертикального перемешивания

температура близка по значениям от поверхности до дна. Во второй декаде июня начинается прогрев поверхностных слоев воды, что приводит к активному развитию фитопланктона и интенсификации процессов новообразования ОВ, поэтому значения кинетических параметров БПК повышаются, что отражается косвенно на отмеченном выше увеличенном потенциале окисления компонентов ОВ в весенний период в сравнении с другими сезонами.

При исследовании концентраций ОВ в крупных озерах [Сабылина и др., 2017] установлено, что важно не общее содержание ОВ, а присутствие в его составе легкоокисляемых фракций (белков, углеводов и липидов) – основных

компонентов живых организмов. Концентрации белков меняются от сезона к сезону и в среднем отличаются в разные годы. В эпилимнионе озер содержание белков в 2 раза выше, чем в гиполимнионе. Доля белков от общего содержания ОВ невысока (всего 1,4 %). В ранее проведенных исследованиях установлено, что в вегетационный период концентрации белков в водах Онежского озера колеблются в диапазоне 0,05–0,56 (среднее 0,23) мг/л. В теплый продуктивный период (в 2011 г.) среднее содержание белков составляло 0,21 мг/л, а в холодный дождливый период (в 2014 г.) оно было в 2 раза ниже. В фотическом слое (0–15 м) в вегетационный период 2011 г. максимальное содержание белков составляло 0,28 мг/л, а в 2014 г. – 0,12 мг/л, в гиполимнионе в эти годы – соответственно 0,17 и 0,07 мг/л. В центральном плесе Онежского озера зимой в 2014 и 2016 гг. концентрация белков составляла 0,16 мг/л, а в придонном слое она была ниже в 1,5 раза [Сабылина и др., 2017].

Результаты оцененных скоростей БПК на линейных участках были пересчитаны в общие затраты растворенного O_2 за период экспериментов ($\omega_s \cdot 126$ сут) и полученные значения сопоставлены с концентрациями стойкого $C_{орг}$ ($C_{стаб}$) в пробах исследуемой воды из центральной части Онежского озера в разные сезоны. На окисление именно $C_{стаб}$ на линейных стадиях процесса расходуется растворенный в воде O_2 (рис. 7), и связь между исходным содержанием в исследуемой воде $C_{стаб}$ и расходом O_2 на линейной стадии описывается уравнением:

$$y = 7,4902 - 1,9216x \quad (R^2 = 0,7561).$$

Построенная зависимость характеризует тенденцию снижения потребления O_2 с ростом концентрации $C_{стаб}$ в исследуемой воде, что не противоречит логике развития окислительных процессов, исследуемых с помощью БПК-теста. На графике выделяются лежащие вблизи друг от друга весенние и осенние точки, что, очевидно, может характеризовать сходные условия по окислению ОВ в указанные сезоны (в частности, в эти периоды отмечено интенсивное перемешивание водных масс). Также видно отдельное положение на графике зимней точки, что вполне логично.

Заключение

Рассмотрены результаты обработки первичных данных по кинетике БПК в длительных, продолжительностью до 84–126 сут, экспериментах при 10 и 20 °С с пробами воды из центральной части Онежского озера. При этом

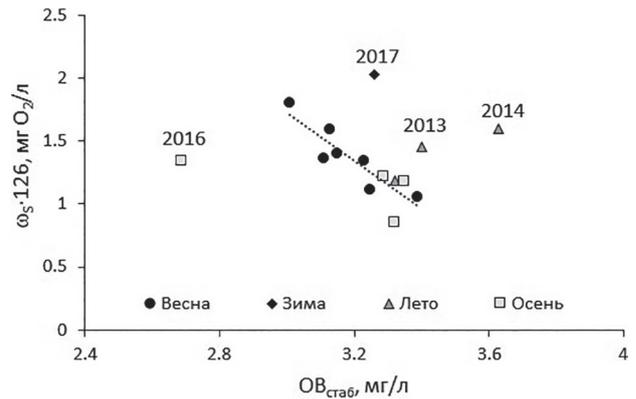


Рис. 7. Взаимосвязь значений БПК на линейной стадии в разные сезоны с содержанием $OM_{стаб}$

Fig. 7. Relationship between BOD values at the linear stage in different seasons and the OM_{stab} content

изучалось влияние на кинетику БПК разных вариантов составления интегральных проб воды, отбираемых в 2012–2017 гг. в разные сезоны: из поверхностного (0,5 или 1 м) и придонного (56 м) горизонтов, из разных горизонтов всей водной толщи, из горизонтов верхнего (фотического) и нижнего (глубинного) слоев. С зимней, весенней, летней и осенней водой в целом проведено соответственно по 2, 7, 3 и 4 эксперимента одновременно при 20 и 10 °С (всего 32 эксперимента). Результаты всех экспериментов обработаны, и получены кинетические уравнения, параметры которых воспроизводят изменения по сезонам значений БПК за весь период эксперимента.

Для долгосрочного изучения кинетики БПК в разные сезоны года рекомендовано использовать интегральные пробы воды из разных горизонтов фотического слоя, обеспечивающие достаточно полную оценку развития БПК в исследуемой природной воде. Как правило, значения кинетических параметров БПК выше при 20 °С в сравнении с их значениями при 10 °С. В ряде экспериментов при разных температурах обнаружено активное развитие БПК, и в одинаковых типах уравнений близки значения кинетических параметров БПК.

Для зимних экспериментов в 2013 и 2017 гг. интегральные пробы составлялись из порций воды из горизонта 1 м. В экспериментах с зимней водой I-я стадия БПК при 20 °С описана уравнением E-типа (со средними значениями $k = 0,196$ сут⁻¹, $[O_2]' = 0,795$ мг O_2 /л и $v_1 = 0,148$ мг O_2 /(л·сут)), а при 10 °С – уравнением A-типа (с параметрами $w_1 = 0,400$ л·мг⁻¹·сут⁻¹, $[O_2]' = 0,605$ мг O_2 /л и $v_1 = 6,58 \cdot 10^{-3}$ мг O_2 /(л·сут)). Развитие II-й стадии БПК (по A-типу) при 20 и 10 °С отмечено в эксперименте 2013 г., а на линейной стадии –

только в эксперименте в 2017 г. (при 20 и 10 °С скорости ω_s близки и равны соответственно 0,0161 и 0,0167 мг O_2 /(л·сут)). Развитие БПК в экспериментах с зимней водой не зависит от условий отбора интегральной пробы и температуры хранения воды, так как полученные значения общего потребления O_2 мало отличаются на I-й и линейной стадиях.

Из семи экспериментов с весенней водой в трех, выполненных в 2012, 2013 и 2017 гг., пробы воды отбирались из горизонта 1 м, для остальных экспериментов – из придонного (56 м) горизонта (в 2012 г.), отдельно из фотического и глубинного слоев (в 2014 г.) и из разных горизонтов водной толщи (в 2016 г.). Для описания динамики БПК при 20 и 10 °С в экспериментах использовались уравнения AL-, EL-, EAL- и EA-типов. Наибольшее потребление O_2 отмечено в экспериментах 2014 г. на I-й стадии БПК в воде из фотического слоя и в 2013 г. в воде из горизонта 1 м. Развитие I-й стадии БПК (по E-типу) в экспериментах с весенней водой при 20 и 10 °С описывается соответственно средними значениями параметров ($k = 0,116$ и $0,107$ сут⁻¹, $[O_2]'$ – 0,630 и 0,593 мг O_2 /л и $v_1 = 0,0769$ и $0,0614$ мг O_2 /(л·сут)), а при развитии по A-типу – соответственно значениями $w_1 = 0,540$ и $0,258$ л·мг⁻¹·сут⁻¹, $[O_2]'$ – 0,553 и 0,610 мг O_2 /л и $v_1 = 0,0240$ и $0,0106$ мг O_2 /(л·сут). Весной при 20 °С средняя скорость потребления O_2 на линейной стадии, ω_s , была в два раза выше, чем при 10 °С.

Эксперименты летом выполнялись в 2013 г. (с интегральной водой из разных горизонтов толщи воды) и дважды в 2014 г. (отдельно с водой из фотического и глубинного слоев). Кинетику БПК при 20 и 10 °С в экспериментах с летней водой характеризуют уравнения AL-, EL- и AAL-типов. Наибольшее потребление O_2 выявлено в воде из фотического слоя. Развитие I-й стадии (по E-типу) при 20 и 10 °С характеризуют близкие средние значения параметров БПК (k соответственно 0,120 и 0,123 сут⁻¹, $[O_2]'$ – 0,670 и 0,548 мг O_2 /л и $v_1 = 0,0804$ и $0,0668$ мг O_2 /(л·сут)). Кинетика БПК в летней воде по A-типу при 20 и 10 °С описывается соответственно параметрами: $w_1 = 0,526$ и $0,380$ л·мг⁻¹·сут⁻¹, $[O_2]'$ – 0,763 и 0,440 мг O_2 /л и $v_1 = 0,0419$ и $0,00222$ мг O_2 /(л·сут). Таким образом, отмечено существенное снижение при 10 °С потребления O_2 при развитии I-й стадии БПК по A-типу в сравнении с развитием по E-типу. Средние скорости БПК на линейном участке при 20 и 10 °С отличаются мало.

Четыре эксперимента осенью выполнялись при разных режимах отбора воды для интегральной пробы: по одному в 2013 г. (со сме-

шанной водой из разных горизонтов водной толщи) и в 2016 г. (с водой из горизонта 1 м) и два в 2014 г. (отдельно с водой из фотического и глубинного слоев). При 20 и 10 °С кинетика БПК в 2013 г. представлена соответственно уравнениями EAL- и EL-типов, в 2016 г. – AAL- и AL-типов, а в 2014 г. – уравнениями EL-типа. Интенсивное потребление O_2 в экспериментах осенью отмечено в воде из горизонта 1 м (2016 г.) и из фотического слоя (2014 г.). При 20 и 10 °С I-ю стадию (по E-типу) характеризуют средние значения параметров (соответственно $k = 0,114$ и $0,174$ сут⁻¹, $[O_2]'$ – 0,753 и 0,231 мг O_2 /л и $v_1 = 0,0773$ и $0,0425$ мг O_2 /(л·сут)), а по A-типу – параметры $w_1 = 0,330$ и $0,403$ л·мг⁻¹·сут⁻¹, $[O_2]'$ – 1,200 и 0,260 мг O_2 /л и $v_1 = 0,306$ и $0,0135$ мг O_2 /(л·сут). Скорости БПК на линейной стадии, ω_s , в экспериментах при 20 и 10 °С составляли 0,00907 и 0,00622 мг O_2 /(л·сут).

Оцененное суммарное БПК за общий период эксперимента 126 сут в зимний период было максимальным (при 20 °С – 4,104, а при 10 °С – 4,096 мг O_2 /л) по сравнению с другими сезонами. Весной суммарное БПК при 20 и 10 °С составляло 3,386 и 2,886 мг O_2 /л соответственно, а летом 3,956 и 2,439 мг O_2 /л при тех же температурах. Минимальные значения установлены в осенний период (при 20 °С – 3,298 и при 10 °С – 1,274 мг O_2 /л).

Доли БПК по сезонам и по стадиям при 20 и 10 °С распределяются по-разному, что свидетельствует о сезонных тенденциях расходования O_2 по отдельным стадиям. При 20 °С происходит постепенное относительное снижение расходования O_2 от зимы к осени на линейной стадии и одновременное возрастание на I-й стадии БПК. При этом на II-й стадии наблюдаются примерно равные относительные потери O_2 в зимней, весенней и летней воде с резким снижением в осенней воде.

Средние значения при 20 °С большинства показателей БПК и ОВ для осеннего и весеннего периодов оказались довольно близки между собой и были ниже, чем зимой и летом. Исключение составляет параметр $\Delta X_{ПК}$, который определяет потенциал окисления компонентов ОВ, и в весенней воде он был в 1,5–2,8 раза выше в сравнении с другими сезонами. Именно с этим связаны и пониженные средние показатели ОВ и БПК для весеннего сезона в сравнении с другими сезонами.

Анализ повышенных и пониженных значений показателей БПК и ОВ в весенней воде показал, что значения этих показателей определяются не только особенностями отбора проб воды, но также и конкретной датой отбора в указанный сезон. Установлено, что:

– в период 3–8 июня повышенные значения БПК на линейном участке обнаруживаются в пробах от поверхности до дна, а повышенные значения показателей ОВ фиксируются только в придонном слое воды;

– в период 12–18 июня повышенные значения показателей БПК и ОВ фиксируются в пробах из поверхностного (1 м) и фотического слоя, а в глубинных слоях отмечены только повышенные значения потребления O_2 на линейном участке.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственных заданий КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН) и Института океанологии им. Ширшова РАН (тема № 0128-2019-0011 «Взаимодействие биосфер в Мировом океане»).

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Литература

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко В. А., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М. Кинетические закономерности разложения органического вещества (на примере притоков Рыбинского водохранилища) // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование / Отв. ред. А. С. Литвинов, Э. С. Бикбулатов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 111–149.

Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.

Зобков М. Б., Зобкова М. В. Устройство для определения органического углерода в воде с фотохимическим персульфатным окислением в системе непрерывного газового потока и ИК-Фурье спектрометрическим детектированием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 8. С. 10–15.

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

Леонов А. В., Бердаццева Л. Б. Оценка процессов разложения органического вещества по кинетическим параметрам БПК (на примере Можайского водохранилища) // Водные ресурсы. 1986. № 4. С. 111–127.

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

Леонов А. В., Зобкова М. В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из водоемов Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 3. С. 61–79. doi: 10.17076/lim952

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

Леонов А. В., Остащенко М. М., Бердаццева Л. Б. Окислительные процессы в воде Можайского водохранилища: характеристика методом главных компонент // Водные ресурсы. 1991. № 2. С. 76–88.

Лозовик П. А. Органическое вещество и биогенные элементы как показатели функционирования водных экосистем // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Матер. V Всерос. симп. с междунар. участием (10–12 сентября 2012 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 361–366.

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

РД 52.24.420-2006. Биохимическое потребление кислорода. Методика выполнения измерений скляночным методом. Ростов-на-Дону: Госгидромет, 2006. 10 с.

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

Сабылина А. В. Химический состав воды Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 72–77.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Рыжаков А. В. Содержание белков в Онежском и Ладожском озерах и реках Свирь и Нева // Экологическая химия. 2017. Т. 28, № 2. С. 79–86.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды озера // Состояние водных объектов Республики Карелия по результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 29–40.

Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17(29). 290 с.

Трегубова Т. М., Кулиш Т. П. Кинетика биохимического потребления кислорода в воде озера // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Отв. ред. Н. А. Петрова. Л.: Наука, 1982. С. 106–116.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.

Швец Л. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследования режима

и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии. Л., 1977. Вып. 2. С. 3–24.

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Labili-ty of organic carbon in lakes of different trophic status // *Freshwater Biol.* 2009. Vol. 54(6). P. 1312–1323. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02183.x

References

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko V. A., Salo Yu. A. Resursy rechnogo stoka i vodnyi balans [River runoff resources and water balance]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovr. sostoyanie i izm. ekosistem pri klimatich. i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 31–38.

Bikbulatov E. S., Bikbulatova E. M. Kineticheskie zakonmernosti razlozheniya organicheskikh veshchestv (na primere pritokov Rybinskogo vodokhranilishcha) [Kinetics of organic matter decomposition (case of the Rybinsk Reservoir tributaries)]. *Formirovanie i dinamika polei gidrol. i gidrokhim. kharakteristik vo vnutr. vodoemakh i ikh modelirovanie* [Formation and dynamics of the fields of hydrol. and hydrochem. characteristics in inland waters and their modeling]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. P. 111–149.

Bul'on V. V. Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoemov [Primary plankton production of inland waters]. Leningrad: Nauka, 1983. 150 p.

Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniya [Lake Onego ecosystem and its trends]. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p.

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

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

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

Leonov A. V., Berdavitseva L. B. Organicheskoe veshchestvo v vode Mozhaiskogo vodokhranilishcha: otsenka ego transformatsii po kineticheskim parametram BPK [Organic matter in the water of Mozhaisk reservoir: an evaluation of its transformation from the kinetic parameters of BOD]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1990. No. 3. P. 63–80.

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

Поступила в редакцию 19.11.2019

Leonov A. V., Ostashenko M. M., Berdavitseva L. B. Okislitel'nye protsessy v vode Mozhaiskogo vodokhranilishcha: kharakteristika metodom glavnykh komponent [Oxidative processes in the Mozhaisk Reservoir water: description by the method of principal components]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1991. No. 2. P. 76–88.

Leonov A. V., Zobkova M. V. Obshchaya kharakteristika razvitiya BPK v dlitel'nykh eksperimentakh s vodoi iz vodoemov Karelii [General characteristics of BOD kinetics in long-term experiments with water from Karelian waterbodies of various types]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 3. P. 61–79. doi: 10.17076/lim952

Lozovik P. A. Organicheskoe veshchestvo i biogen-nye elementy kak pokazatel' funktsionirovaniya vodnykh ekosistem [Organic matter and biogenic elements as an indicator of water ecosystem functioning]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutr. vodoemakh i morskikh vodakh: Mat. V Vseros. simp. (10–14 Sent. 2012 g.)* [Organic matter and biogenic elements in inland waters and sea waters: Proceed. V All-Russ. symp (Sept. 10–12, 2012)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. P. 361–366.

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

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

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

Sabylina A. V. Khimicheskii sostav vody Onezhskogo ozera [Chemical composition of the Lake Onega water]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovr. sostoyanie i izm. ekosistem pri klimatich. i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 61–67.

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki. Khimicheskii sostav vody ozera [Lake Onego and its tributaries. The chemical composition of the lake water]. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* [The state of the water bodies in the Republic of Karelia according to the monitoring results of 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 29–40.

Sabylina A. V., Efremova T. A., Ryzhakov A. V. Soderzhanie belkov v Onezhskom i Ladozhskom ozerakh

i rekakh Svir' i Neva [Protein content in Lakes Onego and Ladoga and the Svir and Neva Rivers]. *Ekol. khim.* [Environmental Chem.]. 2017. Vol. 26, no. 2. P. 79–86.

Shvets L. D. Hidrologicheskaya izuchennost' Onezhskogo ozera i ego basseina [Hydrological study of Lake Onego and its basin]. *Issled. rezhima i raschety vodno-go balansa ozer-vodokhranilishch Karelii* [Regime studies and water balance calculations of the lake-reservoirs in Karelia]. Leningrad, 1977. Iss. 2. P. 3–24.

Skopintsev B. A. Organicheskoe veshchestvo v prirodnykh vodakh (vodnyi gumus) [Organic matter in natural waters (water humus)]. *Tr. GOIN* [SOI Proceed.]. 1950. Iss. 17(29). 290 p.

Tregubova T. M., Kulish T. P. Kinetika biokhimitskogo potrebleniya kisloroda v vode ozera [Biochemical oxygen demand kinetics in lake water]. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera* [Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga]. Leningrad: Nauka, 1982. P. 106–116.

Zobkov M. B., Zobkova M. V. Ustroistvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotokhimi-cheskim persul'fatnym okisleniem v sisteme nepreryv-nogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskim detektirovaniem [A device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in a continuous gas flow system and FTIR spectrometric detection]. *Zavodskaya lab. Diagnostika materialov* [Factory lab. Material diagnostics]. 2015. No. 8. P. 10–15.

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

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

Received November 19, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Леонов Александр Васильевич

главный научный сотрудник, д. х. н., проф.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: leonov@ocean.ru

Зобкова Мария Валентиновна

младший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: rincalika21@yandex.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Leonov, Alexander

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

Zobkova, Maria

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

УДК 556.114:546.3:549 (282.247.211)

ЛИТОФИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ОНЕЖСКОМ ОЗЕРЕ: ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ, СОДЕРЖАНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ

П. А. Лозовик, Н. В. Кулик, Н. А. Ефременко

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

Рассмотрен химический баланс и трансформация литофильных элементов (Fe, Mn, Si и Al) и тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Ni и Pb) в Онежском озере. Выявлено их поступление в озеро от различных источников (с речными водами, атмосферными осадками, подземным стоком, со сточными водами, дренажным стоком с селитебных территорий и со свалок бытовых отходов). Проведено нормирование допустимого поступления элементов в озеро с учетом его ассимиляционной способности и по принципу сохранения геохимического класса вод.

Ключевые слова: Онежское озеро; природная и антропогенно допустимые нагрузки; удерживающая способность; константа скорости трансформации; ассимиляционная способность озер.

P. A. Lozovik, N. V. Kulik, N. A. Efremenko. LITHOPHILE ELEMENTS AND HEAVY METALS IN LAKE ONEGO: SOURCES, CONCENTRATIONS AND TRANSFORMATION

The article deals with the chemical balance and transformation of lithophile elements (Fe, Mn, Si, and Al) and heavy metals (Cu, Zn, Cd, Ni, and Pb) in Lake Onego. They were found to arrive in the lake from various sources (streamflow, precipitation, base flow, sewage, runoff from residential areas, and leakage from municipal waste landfills). The permissible input of the elements to the lake was estimated taking into account its assimilation capacity and the requirement to maintain the geochemical class of the water.

Keywords: Lake Onego; natural and anthropogenically permissible loads; retention capacity; rate constant of transformation; assimilation capacity of lakes.

Введение

Литофильные элементы играют важную роль в объектах гидросферы. К таким элементам относятся Fe, Mn, Si и Al, которые широко распространены в земной коре, но растворимость их соединений в воде низкая. Одна из основных особенностей этих соединений – высокая

склонность к гидролизу. Исходя из констант гидролиза солей Al и Fe ожидать высоких концентраций Al^{3+} и Fe^{3+} в воде не приходится (на уровне микрограммовых количеств в литре воды). В то же время в природных водах за счет комплексообразования, кислотности среды и дефицита кислорода их содержание может достигать нескольких мг/л.

При тех pH, которые наблюдаются в природных водах, соли кремниевой кислоты полностью гидролизваны и в растворе присутствует только кремниевая кислота. Растворимость SiO_2 в воде достаточно низкая (20 мг/л).

Для тяжелых металлов (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni и др.) характерно низкое их содержание в природных водах, но одновременно они являются основными загрязняющими веществами водных объектов. Их количество и трансформация в водной среде в определенной степени детерминируются литофильными элементами. По формальным признакам Fe и Mn также относятся к тяжелым металлам, но их особая роль в объектах гидросферы, более высокое содержание (на уровне макрокомпонентов) и зачастую чисто природное происхождение дают основание выделять их в отдельную группу веществ. Поэтому изучение литофильных элементов и тяжелых металлов при их совместном присутствии представляет определенный интерес. В этой связи наиболее актуально их рассмотрение в экосистеме Онежского озера – крупного олиготрофного олигогумусного водоема, играющего важную роль в экономике и сохранении природного равновесия в регионе.

Целью работы было установить поступление в Онежское озеро литофильных элементов и тяжелых металлов от различных источников, а также выяснить их содержание и степень трансформации в озере.

Объекты и методы исследования

Поступление литофильных элементов и тяжелых металлов в Онежское озеро изучалось относительно основных источников формирования химического состава его воды. Прежде всего учитывалось их поступление с речными водами и атмосферными осадками. Наблюдения на 27 притоках Онежского озера проводились в различные сезоны года (2007–2008 и 2015–2016 гг.), что позволило получить средневзвешенные по стоку концентрации элементов и установить их вынос в озеро с речными водами.

Атмосферные осадки изучались в бассейне озера и на акватории летом и в период максимального снегонакопления. По литературным данным также рассмотрено поступление элементов с подземными водами, разгружающимися непосредственно в озеро, минуя гидрографическую сеть [Бородулина, 2010]. Из антропогенных источников исследованы сточные воды основных населенных пунктов, расположенных в бассейне озера и на его побережье,

а также вынос металлов с селитебных территорий и со свалок бытовых отходов.

Многолетние наблюдения (с 1993 по 2016 г.) проведены в различных районах Онежского озера (рис. 1). В целом исходная база данных насчитывала свыше 2000 элемент-определений. На основании химического баланса озера по каждому элементу вычислены удерживающая способность и кинетические характеристики трансформации веществ в озере по модели П. А. Лозовика [Лозовик и др., 2011], что позволило в конечном итоге оценить ассимиляционную способность водоема и осуществить нормирование допустимой антропогенной нагрузки на озеро по тяжелым металлам и литофильным элементам. Необходимые для расчета гидрологические сведения – по объему водного стока рек, а также стоку с различных территорий, объемам сточных вод и атмосферных осадков – заимствованы из работы [Лозовик и др., 2016].

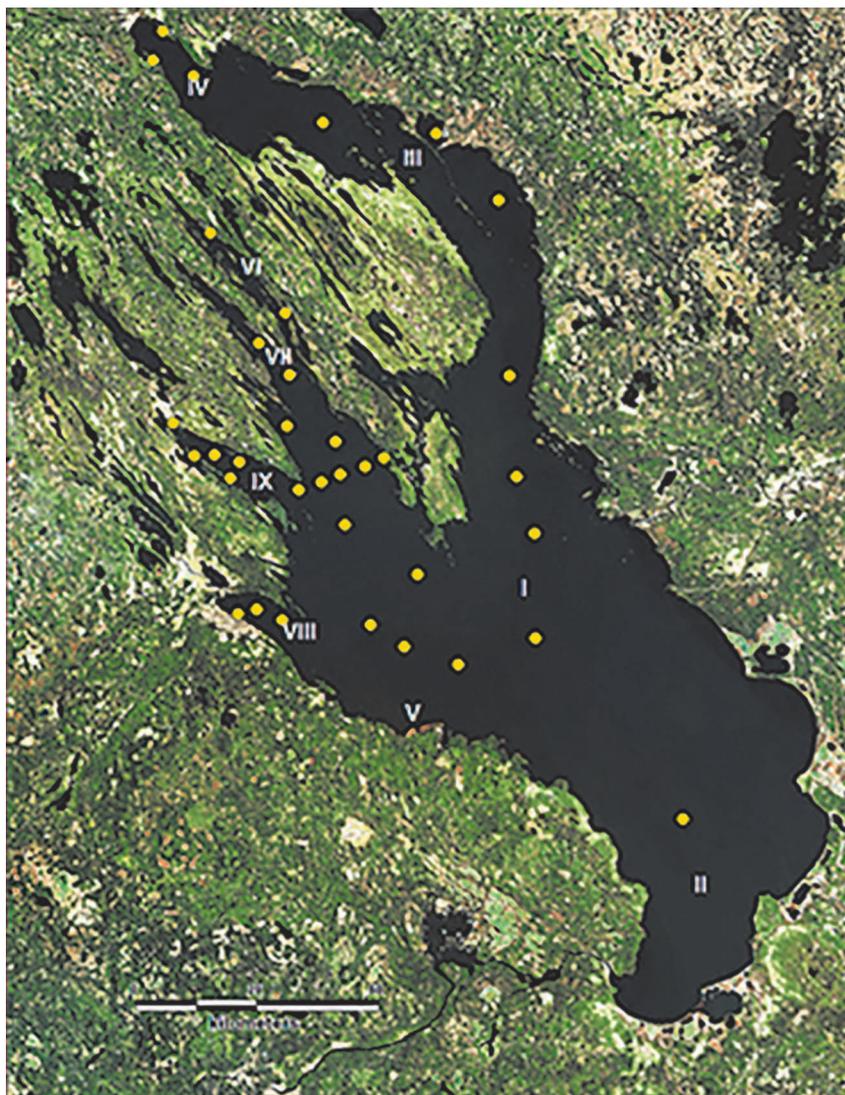
Отбор проб воды на химический анализ осуществлялся батометром Руттнера, для тяжелых металлов использовался пластиковый батометр.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук». Определение Si осуществлялось фотометрическим методом в виде желтой кремниймолибденовой гетерополикислоты [РД 52.24.433-2005], Al – фотометрическим методом с эрихромцианом Р [Новиков и др., 1990], а с 2015 года – с хромазуролом S [РД 52.24.449-2008]. Остальные металлы определялись атомной абсорбцией: Fe, Mn – с атомизацией проб в пламени [ПНД Ф 14.1:2:4.139-98], Zn, Cu, Pb, Cd, Ni – с электротермической атомизацией проб [РД 52.24.377–2008; ГОСТ 31870-2012].

Достоверность химических анализов проверялась путем внутреннего и внешнего контроля. Последний проводился в рамках международного проекта ICP Waters [Intercomparison..., 2009, 2012, 2014, 2015]. Получена хорошая сходимость результатов анализа металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Cd).

Результаты и обсуждение

Для оценки поступления в Онежское озеро веществ с речными водами обследовано 27 его притоков, среди них три крупные реки Водла, Шуя и Суна, которые дают 58 % водного стока в озеро. Речной приток в озеро составляет 17,4 км³/год (или 73 % от общего притока).



Станции отбора проб на Онежском озере.

Здесь и в табл. 7: I – Центральный плес, Большое и Малое Онего, II – Южное Онего, III – Заонежский и Повенецкий заливы, IV – Большая губа Повенецкого залива, V – Петрозаводское Онего, VI – Уницкая губа, VII – Лижемская губа, VIII – Петрозаводская губа, IX – Кондопожская губа

Sampling stations on Lake Onego.

Here and in Tab. 7 lake area: I – Central Onego, Big and Small Onego, II – South Onego, III – Zaonezhsky and Povenets Gulfs, IV – Bolshaya (Big) Bay of Povenets Gulf, V – Petrozavodskoye Onego, VI – Unitskaya Bay, VII – Lizhemskaaya Bay, VIII – Petrozavodskaya Bay, IX – Kondopozhskaya Bay

Наблюдения на реках проведены в различные сезоны. С учетом сезонного распределения стока рек получены средневзвешенные по стоку концентрации веществ в каждой реке. Далее на основании данных по водному стоку каждой реки вычислялась средневзвешенная по стоку концентрация элементов в речных водах, поступающих в озеро.

Для рек характерна высокая вариабельность содержания Fe и Mn, обусловленная различ-

ной гумусностью их воды (табл. 1). Высокая изменчивость концентраций характерна и для Al (от 17 до 415 мкг/л), что связано с наличием в бассейнах некоторых рек глинистых пород. Концентрация Si изменялась в достаточно узких пределах от 1,1 до 5,4 мг/л, и его содержание является типичным для поверхностных вод Карелии.

Что касается тяжелых металлов, то их содержание в речных водах находится на уровне

Таблица 1. Статистические показатели содержания элементов в водах притоков Онежского озера

Table 1. Statistical indicators of the elements content in the tributaries of Lake Onego

Показатель Statistical indicators	Fe	Mn	Si	Al	Zn	Cu	Cd
	мг/л mg/l			мкг/л µg/l			
Медиана Median	0,88	0,05	2,5	145	7,2	1,4	0,01
Среднее арифметическое Average	1,10	0,07	2,7	167	8,5	1,9	0,02
Стандартное отклонение Standard deviation	1,01	0,07	1,1	106	5,2	1,3	0,03
Среднее геометрическое Geometric mean	0,80	0,05	2,5	132	7,5	1,5	0,02
Min	0,08	0,01	1,1	17	2,6	0,2	0,01
Max	6,40	0,63	5,4	415	35,1	5,7	0,12
Средневзвешенная концентрация Weighted average concentration	0,79	0,06	2,1	174	10,1	1,4	0,02

Таблица 2. Статистические показатели содержания элементов в атмосферных осадках

Table 2. Statistical indicators of the elements content in atmospheric precipitation

Показатель Statistical indicators	Fe	Mn	Si	Al	Zn	Cu	Cd
	мг/л mg/l			мкг/л µg/l			
Медиана Median	0,04	0,003	0,02	12	4,7	0,6	0,03
Среднее арифметическое Average	0,05	0,005	0,02	14	7,7	0,6	0,04
Стандартное отклонение Standard deviation	0,01	0,001	0,002	4,6	4,2	0,3	0,05
Среднее геометрическое Geometric mean	0,03	0,004	0,02	14	5,3	0,5	0,03
Min	0,005	0,003	< 0,01	8	1,2	0,1	0,01
Max	0,570	0,006	0,06	24	15,6	1,2	0,30

региональных фоновых величин [Лозовик, Платонов, 2005]. Концентрации Cd, Ni, Pb намного ниже их ПДК для рыбохозяйственных водоемов, а содержание Cu и Zn зачастую превышает ПДК. Такая картина является характерной и для других рек региона, и это не связано с их загрязнением этими металлами, а, по-видимому, является отражением геохимических особенностей территорий.

В атмосферных осадках концентрации всех литофильных элементов низкие, и они намного меньше, чем в речных водах, а вот содержание тяжелых металлов находится на том же уровне (табл. 2). Объем осадков, выпадающих на поверхность озера, в среднем составляет 6,3 км³/год (или 26 % от общего притока) [Лозовик и др., 2016].

Объем сточных вод, поступающих в бассейн озера, невысокий – 0,07 км³/год (или 0,3 % от общего притока) [Лозовик и др., 2016]. В сточных водах отмечено повышенное содержание всех металлов за исключением Fe (табл. 3). Для Cu и Zn это обусловлено тем, что

при водоподготовке и водоподаче используются оцинкованные трубы, а также детали, изготовленные из меди.

Аналогичная картина по Cu и Zn отмечается для ливневых вод и дренажных вод с селитебных территорий и со свалок бытовых отходов (табл. 4 и 5). Объем стока с селитебных территорий на водосборе при среднем слое стока 360 мм составляет 9770 тыс. м³ (или 0,04 % от общего притока), а объем стока дренажных вод со свалок бытовых отходов, поступающих в бассейн озера, невысокий – 3940 тыс. м³/год (или 0,02 % от общего притока) [Лозовик и др., 2016]. Для последних характерно наиболее высокое содержание Cd по сравнению с другими водами (табл. 4 и 5).

Что касается подземных вод, разгружающихся в озеро минуя гидрографическую сеть, то для них характерно повышенное содержание Mn, Zn, Cu и Cd по сравнению с речными водами [Бородулина, 2010, 2011] (табл. 6). Количество подземных вод, поступающих непосредственно в озеро, минуя гидрографическую сеть,

Таблица 3. Статистические показатели содержания элементов в сточных водах

Table 3. Statistical indicators of the elements content in sewage

Показатель Statistical indicators	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
	мг/л mg/l		мкг/л µg/l		
Медиана Median	0,55	0,17	33,0	6,4	0,06
Среднее арифметическое Average	0,65	0,27	36,9	20,1	0,06
Стандартное отклонение Standard deviation	0,51	0,30	28,7	55,0	0,04
Среднее геометрическое Geometric mean	0,45	0,15	26,8	6,0	0,05
Min	0,10	0,02	6,6	1,0	0,01
Max	1,98	1,10	107,0	211,0	0,20
Средневзвешенная концентрация Weighted average concentration	0,33	0,20	29,7	4,1	0,08

Таблица 4. Статистические показатели содержания элементов в ливневых и дренажных водах с селитебных территорий

Table 4. Statistical indicators of the elements content in stormwater and runoff from residential areas

Показатель Statistical indicators	Fe	Mn	Si	Al	Zn	Cu	Cd
	мг/л mg/l			мкг/л µg/l			
Медиана Median	1,42	0,27	3,8	31	7,1	4,2	0,10
Среднее арифметическое Average	4,30	0,32	3,9	59	7,4	5,0	0,12
Стандартное отклонение Standard deviation	9,46	0,23	1,5	82	4,2	3,7	0,09
Среднее геометрическое Geometric mean	1,69	0,25	3,6	35	6,4	4,0	0,09
Min	0,5	0,1	1,7	6	2,5	1,1	0,01
Max	43,1	0,9	6,5	307	18,3	13,4	0,30

невелико (0,14 км³/год, или 0,6 % от общего притока) [Лозовик и др., 2016].

Концентрации всех литофильных элементов, а также Zn в воде Онежского озера намного меньше, чем во всех источниках формирования химического состава его воды (табл. 7). Связано это с их трансформацией в озере и захоронением в донных отложениях. Содержание Cu, Pb, Ni и Cd в воде Онежского озера находится на том же уровне, что и в речных водах и атмосферных осадках. Поскольку концентрации этих элементов в приточных водах весьма низкие, внутриводоемные процессы не приводят к какому-либо их изменению. Из отдельных участков озера выделяются Петрозаводская и Кондопожская губы – повышенным содержанием Fe, Mn, Si, а также Южное Онего – низкими концентрациями Si (0,1 мг/л) и Уницкая губа – повышенным его содержанием (0,6 мг/л).

Таблица 5. Статистические показатели содержания элементов в дренажных водах со свалок бытовых отходов

Table 5. Statistical indicators of the elements content in drainage water from landfills

Показатель Statistical indicators	Fe	Mn	Zn	Cu
	мг/л mg/l		мкг/л µg/l	
Медиана Median	5,8	0,03	15	2,6
Среднее арифметическое Average	14,4	0,32	17	3,2
Стандартное отклонение Standard deviation	19,8	0,59	11	2,3
Среднее геометрическое Geometric mean	7,3	0,07	14	2,6
Min	2	0,02	7	1,1
Max	43,9	1,2	31	6,4

Таблица 6. Статистические показатели содержания элементов в подземных водах

Table 6. Statistical indicators of the elements content in groundwater

Показатель Statistical indicators	Fe	Si	Mn	Al	Zn	Cu	Cd
	мг/л mg/l			мкг/л µg/l			
Медиана Median	0,2	2,6	24,4	35	36	2,5	0,06
Min	< 0,01	0,5	0,1	0,15	0,5	0,5	< 0,01
Max	89,4	10,3	6355	770	1800	100	21

Таблица 7. Статистические показатели содержания литофильных элементов и тяжелых металлов в воде Онежского озера

Table 7. Statistical indicators of the lithophile elements and heavy metals content in the water of Lake Onego

Район озера Lake Onego area	Объем, км ³ Volume, km ³	Стат. показатель Statistical indicator	Fe	Mn	Si	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni
			мг/л mg/l			мкг/л µg/l				
I	217,2	Median	0,07	0,01	0,22	1,2	0,8	0,20	0,02	0,30
		Min	0,01	0,00	0,12	0,2	0,4	0,05	0,01	0,03
		Max	0,23	0,07	0,39	11,7	6,1	6,10	1,10	1,40
II	10	Median	0,07	0,01	0,12	8,4	1,7	1,50	0,05	-
		Min	0,01	0,01	0,07	4,6	1,3	0,60	0,04	-
		Max	0,22	0,02	0,41	21,0	6,1	9,00	0,27	-
III	26,7	Median	0,08	0,02	0,42	3,8	0,7	0,50	0,08	0,40
		Min	0,04	0,00	0,18	0,2	0,5	0,10	0,01	0,20
		Max	0,14	0,20	0,59	14,6	4,4	4,30	1,30	2,60
IV	3,8	Median	0,05	0,01	0,50	4,4	1,4	0,40	0,07	0,70
		Min	0,04	0,01	0,20	2,0	0,5	0,10	0,02	0,40
		Max	0,10	0,05	1,90	6,7	12,9	0,50	0,13	4,10
V	8,6	Median	0,07	-	0,39	-	-	-	-	0,03
		Min	0,07	-	0,31	-	-	-	-	-
		Max	0,08	-	0,46	-	-	-	-	-
VI	1,8	Median	0,09	0,03	0,61	3,5	0,6	0,30	-	0,20
		Min	0,04	0,03	0,39	1,1	0,6	0,20	0,02	0,20
		Max	0,28	0,04	1,16	5,8	0,9	0,70	-	-
VII	4,7	Median	0,04	0,01	0,39	21,0	1,0	-	-	-
		Min	0,04	0,01	0,24	20,0	1,0	-	-	-
		Max	0,08	0,02	1,80	22,0	1,0	-	-	-
VIII	1,2	Median	0,17	0,03	0,40	5,7	1,2	0,20	0,02	0,28
		Min	0,05	0,01	0,08	1,0	0,4	0,05	0,01	0,10
		Max	0,87	0,09	2,50	45,0	28,0	8,00	0,28	1,09
IX	4,7	Median	0,15	0,02	0,70	4,7	1,0	0,27	0,03	0,29
		Min	0,02	0,01	0,00	0,4	0,4	0,05	0,01	0,03
		Max	0,68	0,07	1,76	50,0	21,0	8,00	2,40	1,00
Объем обследованных участков Volume of the studied sites	278,7		Средневзвешенная концентрация Weighted average concentration							
			0,08	0,01	0,26	2,26	0,87	0,03	0,27	0,29

Примечание. Прочерк – нет данных.

Note. The line means no data.

В сравнении с морскими водами содержание Fe, Mn и Al в воде озера выше, Si – одного порядка [Алекин, Ляхин, 1984], а содержание Cu и Zn меньше, чем в океанической воде. Поскольку химические элементы в воде морей и океанов находятся большей частью в виде растворимых соединений, то их концентрации в морской воде следует считать предельными. Поэтому содержание Cu и Zn в воде Онежского озера близко к предельному их содержанию в морской воде.

Имеющиеся данные по источникам формирования химического состава воды озера позволяют получить химический баланс водоема по изучаемым элементам и оценить вклад каждого источника в поступление элементов в озеро (табл. 8).

Как видно из табл. 8, основной вклад по всем элементам дают речные воды (68–98 % от общего поступления каждого в отдельности). По некоторым элементам (Zn, Cu) значима роль атмосферных осадков (13–30 %). Подземный сток в пределах 1–3 % отражается на поступлении Cu, Zn, Mn. Что касается антропогенных источников (сточных вод, селитебных территорий и свалок), то их роль несущественна (поступление менее 1 % от общего).

На основании химического баланса озера можно установить его удерживающую способность (R) по отдельным элементам, а также константы скорости их трансформации, ассимиляционную способность озера и ассимиляцию веществ в нем.

Удерживающая способность рассчитывалась по формуле:

$$R = \frac{\bar{C}_{пр} - \bar{C}_{оз}}{\bar{C}_{пр}},$$

где $\bar{C}_{пр}$, $\bar{C}_{оз}$ – средневзвешенные концентрации вещества в приточных водах и в озере соответственно. Под приточными понимаются все воды, которые поступают в озеро (речные, подземные, от антропогенных источников и с атмосферными осадками). Средневзвешенная концентрация веществ в них рассчитывается по стоку из озера, т. е. с учетом испарения воды с поверхности озера. Для расчета средневзвешенной концентрации веществ в приточных водах необходимо поступление веществ (табл. 8) разделить на объем стока из озера (18,8 км³/год).

По уравнению связи R с периодом водообмена озера и константой скорости трансформации веществ в них можно вычислить значение последней [Лозовик и др., 2011]:

$$R = \frac{k\tau}{1 + k\tau e^{-\frac{1}{\tau}}} \text{ или } k\tau = \frac{R}{1 - R e^{-\frac{1}{\tau}}}.$$

За ассимиляционную способность водного объекта принимается истинная скорость трансформации вещества в его воде, определяемая как произведение концентрации на константу скорости трансформации: $V = kC$, а за величину ассимиляции вещества в водном объекте As – произведение скорости на объем воды [Лозовик, 2015]. Для рек ассимиляция будет выражаться произведением скорости на среднегодовой сток реки в данном створе: $As_{рек} = kC_{р} V_{сток}$. Для озер необходимо учитывать ассимиляцию вещества непосредственно в озерной котловине: $As_{оз} = kC_{оз} V_{оз}$ и за ее пределами, рассчитываемую по стоку воды из озера: $As_{сток} = kC_{оз} V_{сток}$. Суммарная ассимиляция вещества в озерных системах будет равна $As = kC_{оз} (V_{оз} + V_{сток}) = kC_{оз} V_{сток} (t + 1)$. Последнее уравнение является общим и для озер и рек, только для последних $t = 0$ [Лозовик, 2010, 2015].

Полученные расчетные параметры, указанные выше, представлены в табл. 9.

Как видно из табл. 9, наибольшая удерживающая способность отмечается для Fe (0,89) и Si (0,87). Высокие ее значения характерны для Mn, Al, Zn (0,78–0,83), тогда как для меди она низкая (0,40). Последнее, по-видимому, связано с тем, что содержание меди как в приточных водах, так и в озерных незначительное и внутриводоемные процессы слабо отражаются на ее трансформации. По-видимому, по этой причине не удалось вычислить удерживающую способность озера по Cd, Ni, Pb.

В соответствии со значениями R получены и константы скорости трансформации элементов. Наибольшие значения k отмечены для Fe (0,35 год⁻¹) и Si (0,30 год⁻¹). Согласно константе время полупревращения ($t_{1/2}$) Fe в озерной системе составляет 2 года, Si – 2,3 года. Для Mn, Al и Zn получены близкие значения констант (0,19–0,24 год⁻¹) и большие – времени полупревращения (2,9–3,6 года). Для меди установлено самое низкое значение константы (0,04 год⁻¹) и самое высокое время полупревращения (17,3 года). По-видимому, по химическому балансу меди в озере не представляется возможным точно вычислить константу скорости ее превращения. Логичнее было ожидать близкое значение k для Cu и Zn, а в действительности получили весьма разные значения.

Ассимиляционная способность Онежского озера, т. е. скорость удаления из водной среды литофильных элементов и тяжелых металлов, составляет (в мкг/л в год): для Fe – около

Таблица 8. Содержание элементов и их поступление в Онежское озеро в зависимости от различных источников (2007–2008 гг.)

Table 8. Content of elements and their input into Lake Onego depending on various sources (2007–2008)

Элемент Element		Речной сток Streamflow	Атмосферные осадки Precipitation	Подземные воды Groundwater	Сточные воды Sewage	Селитебные территории Residential areas	Свалки Landfills	Всего Total
Fe	Концентрация, мг/л Concentration, mg/l	0,79	0,04	0,20	0,33	1,42	5,8	0,75*
	Поступление, т Input, tons	13746	252	28	22	14	23	14685
	Доля поступления, % Share of input, %	96,6	1,8	0,2	0,2	0,1	1,2	100
Mn	Концентрация, мг/л Concentration, mg/l	0,06	0,003	0,20	0,20	0,32	0,03	0,06*
	Поступление, т Input, tons	1044	19	28	13	3	0,1	1107
	Доля поступления, % Share of input, %	93,4	1,8	2,7	1,3	0,3	0,5	100
Si	Концентрация, мг/л Concentration, mg/l	2,1	0,02	2,6	3,9	3,9	3,9	2,0*
	Поступление, т Input, tons	36540	126	364	266	38	15	37349
	Доля поступления, % Share of input, %	97,9	0,3	1,0	0,7	0,1	< 0,1	100
Zn	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/l	10,1	4,7	36,0	29,7	7,4	15,0	11,3*
	Поступление, т Input, tons	176	30	5	2	0,1	0,1	213
	Доля поступления, % Share of input, %	82,7	14,0	2,4	0,9	< 0,1	< 0,1	100
Cu	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/l	1,4	0,6	2,5	4,1	5,0	6,4	1,5*
	Поступление, т Input, tons	24	4	0,4	0,3	0,1	0,03	29
	Доля поступления, % Share of input, %	84,1	13,4	1,2	0,9	0,2	0,1	100
Al	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/l	174	10	35	174	31	174	165*
	Поступление, т Input, tons	3028	63	5	12	0,3	7	3109
	Доля поступления, % Share of input, %	97,4	2	0,2	0,4	< 0,1	< 0,1	100
Cd	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/l	0,02	0,03	0,06	0,08	0,12	0,13	0,03*
	Поступление, т Input, tons	0,4	0,2	0,008	0,01	< 0,01	< 0,001	1
	Доля поступления, % Share of input, %	67,6	30,0	1,3	0,9	0,2	0,1	100

Примечание. *Средневзвешенная концентрация в приточных водах.

Note. *Weighted average concentration in inflowing water.

28, Si – 78, Al – 7, Mn – 2,4, Zn – 0,5, Cu – 0,04 (табл. 9).

Наибольшая ассимиляционная способность отмечается для Fe, Si и Al. Для Mn и Zn она одного порядка (0,5–2,4 мкг/л в год), а для Cu – наименьшая (0,04 мкг/л в год). Последняя

величина, возможно, занижена в связи с неточным установлением удерживающей способности озера по этому элементу.

Ассимиляция веществ оценена непосредственно для озера и в истоке из озера. В связи со значительным периодом водообмена

Таблица 9. Удерживающая способность Онежского озера к различным элементам, их ассимиляция в озере и кинетические параметры трансформации

Table 9. Retention capacity of Lake Onego to various elements, their assimilation in the lake and kinetic parameters of transformation

Параметры Parameters	Fe	Mn	Si	Al	Zn	Cu
	мг/л mg/l			мкг/л µg/l		
\bar{C}_{lake}	0,08	0,01	0,26	37	2,30	0,90
\bar{C}_{np} \bar{C}_{inflow}	0,75	0,06	2,0	165	11,3	1,5
R	0,89	0,83	0,87	0,78	0,80	0,41
k, год ⁻¹ k, year ⁻¹	0,35	0,24	0,30	0,19	0,21	0,04
$t_{1/2}$, год $t_{1/2}$, year	2,0	2,9	2,3	3,66	3,3	17,3
u, мкг/л в год u, µg/l per year	28,6	2,34	78,0	7,0	0,48	0,04
$As_{оз}$, т/год As_{lake} , tons/year	8204	703	22854	2051	141	11,7
$As_{сток}$, т/год As_{drain} , tons/year	526	45	1466	132	9	0,8
As , т/год As , tons/year	8730	748	24320	2183	150	12,5

Таблица 10. Допустимые нагрузки на Онежское озеро литофильными элементами и некоторыми тяжелыми металлами, т/год

Table 10. Permissible load of the lithophile elements and some heavy metals on Lake Onego, tons/year

Вид нагрузки Type of load	Fe	Mn	Si	Al	Zn	Cu
Природная Natural	14026	1091	37030	3096	211	28
Допустимая антропогенная Permissible man-induced	8730	748	24320	2193	150	13
Допустимая общая нагрузка Permissible total	22756	1839	61350	5279	361	41
$C_{доп}^*$ $C_{permissible}^*$	мг/л mg/l			мкг/л µg/l		
	0,13	0,017	0,42	62	3,8	1,3
$C_{фон}$ $C_{background}$	0,08	0,01	0,26	37	2,3	0,9
$C_{доп}/C_{фон}$ $C_{permissible}/C_{background}$	1,63	1,71	1,62	1,68	1,65	1,44

Примечание. *Концентрация в озере, отвечающая допустимой нагрузке.

Note. *Concentration in the lake corresponding to the permissible load.

Онежского озера ($t = 15,6$ года) озерная ассимиляция намного больше, чем в истоке из озера. Для водоемов с большим t , каким является Онежское озеро, характерна значительная аккумуляция веществ в озерной котловине. Так, озерная ассимиляция Fe и Si в Онежском озере достигает 30–35 %, а Mn, Al и Zn – около 21 % от запаса этих элементов в озере, а от их годового притока – в среднем 65 %.

Поскольку в бассейне Онежского озера и на его побережье отсутствуют значимые источники загрязнения озера металлами и антропогенная составляющая по тяжелым металлам

в стоке в озеро менее 1 %, можно считать, что наблюдаемые концентрации металлов и, по-видимому, литофильных элементов близки к природным фоновым для этого озера. С учетом данного обстоятельства можно вычислить допустимую нагрузку этими элементами на озеро, принимая допустимую антропогенную нагрузку равной ассимиляции вещества в озере в его природном состоянии [Лозовик и др., 2016]

Исходя из вышеизложенного выполнены расчеты допустимой нагрузки на озеро по исследованным элементам (табл. 10). Согласно общей нагрузке и допустимой антропогенной

с учетом удерживающей способности водоема концентрации элементов в воде озера увеличатся несущественно (табл. 10), в среднем по всем шести элементам в 1,62 раза. Установленная концентрация будет соответствовать содержанию элементов в воде, характерному для той же категории водоемов, к которой Онежское озеро относится в современный период. Повышение концентрации элементов в озере согласуется с другим принципом нормирования допустимой антропогенной нагрузки: увеличение концентрации вещества в озере не должно приводить к изменению геохимического класса вод, и оно должно быть не более $\sqrt{2,5}$ -кратного по сравнению с его природным содержанием, т. е. не более чем в 1,58 раза [Лозовик, 2006]. Наибольшие изменения будут характерны для Al (с 37 до 68 мкг/л), Zn (с 2,3 до 4,0 мкг/л) и Cu (с 0,9 до 1,6 мкг/л). Но они будут находиться на уровне региональных фоновых величин по этим металлам, и загрязнение озера металлами будет незначительным.

Заключение

Основное поступление литофильных элементов и тяжелых металлов в Онежское озеро связано с речным стоком (68–97 % от общего поступления каждого элемента в отдельности). Существенна роль атмосферных осадков в балансе Cd (30 %), Zn (14 %) и Cu (13 %). Определенный вклад дают подземные воды по Mn, Zn, Cu и Cd (1,3–2,4 %). Антропогенные источники (сточные воды, селитебные территории и свалки бытовых отходов) вносят несущественный вклад, менее 1 %. На основании данных по химическому балансу озера рассчитана удерживающая способность водоема к литофильным элементам и тяжелым металлам, а также кинетические параметры их трансформации. Наибольшая удерживающая способность и константа скорости трансформации характерна для Si и Fe ($R \approx 0,88$, $k \approx 0,33 \text{ год}^{-1}$). Для Mn, Al и Zn их значения были несколько ниже, чем для Fe и Si ($R \approx 0,80$, $k \approx 0,21 \text{ год}^{-1}$). Самые низкие R и k отмечены для Cu ($R = 0,4$, $k = 0,04 \text{ год}^{-1}$), что, по-видимому, связано с невозможностью точно установить скорость трансформации Cu в озере в связи с низкими и близкими концентрациями его в воде озера и приточных водах. По этой же причине не удалось рассчитать R и k для Ni, Cd и Pb. Наибольшая ассимиляция в озере отмечается для Si (24320 т/год), Fe (8730 т/год) и Al (2183 т/год). Меньшие величины характерны для Mn (748 т/год), Zn (150 т/год) и Cu (13 т/год). С учетом природной ассимиляционной способности озера получены допустимая антропоген-

ная и общая нагрузки на озеро литофильными элементами и тяжелыми металлами. При их достижении произойдет увеличение концентраций элементов в озере в 1,6 раза, что согласуется с оценкой допустимой нагрузки по принципу сохранения геохимического класса вод. Это увеличение будет соответствовать природному типу вод и не скажется на состоянии озера.

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

Литература

- Алекин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 344 с.
- Бородулина Г. С. Оценка подземного стока в Онежское озеро // Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования: Материалы междунар. науч. конф. (Москва, 13–14 мая 2010 г). М.: МАКС Пресс, 2010. С. 270–276.
- Бородулина Г. С. Роль подземного стока в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 108–116.
- ГОСТ 31870-2012. Вода питьевая: определение содержания элементов методами атомной спектроскопии. Ввод в действие 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.
- Лозовик П. А. Ассимиляционная способность водоемов к органическому веществу и фосфору общему // Современные проблемы гидроэкологии: Тезисы докладов IV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти Г. Г. Винберга (Санкт-Петербург, 11–15 октября 2010 г.). СПб., 2010. 108 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.
- Лозовик П. А. Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты с экологических и геохимических позиций // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»: Сб. науч. трудов конф. (Петрозаводск, 6–11 июля 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 446–452.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303
- Лозовик П. А. Оценка состояния и загрязнения водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них с учетом процессов, происходящих в водной среде // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: Мат-лы науч. конф. с междунар. участием (Ростов-на-Дону, 8–10 сентября 2015 г.). Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2015. С. 252–256.

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

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–29.

РД 52.24.377-2008. Массовая концентрация алюминия, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, серебра, хрома и цинка в водах. Методика выполнения измерений методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией проб. Утв. Росгидромет 25.08.2008, ввод в действие 01.11.2008, актуализация 01.01.2019. Ростов-на-Дону, 2008. 29 с.

РД 52.24.449-2008. Массовая концентрация алюминия в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. Утв., ввод в действие Росгидромет 04.06.2008. Ростов-на-Дону, 2008. 29 с.

РД 52.24.433-2005. Массовая концентрация кремния в поверхностных водах суши. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдодокремниевой кислоты. Утв. Росгидромет 30.06.2005, ввод в действие 01.07.2005, актуализация 01.01.2019. Ростов-на-Дону, 2005. 25 с.

Новиков Ю. В., Ласточкина К. О., Болдина З. Н. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990. 440 с.

References

Alekin O. A., Lyakhin Yu. I. Khimiya okeana [Ocean chemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 344 p.

Borodulina G. S. Otsenka podzemnogo stoka v Onezhskoe ozero [Assessment of the underground flow into Lake Onego]. *Resursy podzemnykh vod: Sovr. probl. izucheniya i ispol'zovaniya: Mat. mezhdunar. nauch. konf. (Moskva, 13–14 maya 2010 g.)* [Groundwater resources: Modern probl. of study and use: Proceed. int. sci. conf. (Moscow, May 13–14, 2010)]. Moscow: MAKSS Press, 2010. P. 270–276.

Borodulina G. S. Rol' podzemnogo stoka v formirovaniy khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod Karelii [Role of groundwater flow to lakes of the Onega watershed in formation of the chemical composition of lake water]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 108–116.

GOST 31870–2012. Voda pit'evaya: opredelenie soderzhaniya elementov metodami atomnoi spektrometrii [Drinking water. Determination of elements content by atomic spectrometry methods]. Vvod. v deistvie 01.01.2014 [commissioning 01.01.2014]. Moscow: Standartinform, 2013. 20 p.

Lozovik P. A. Assimilyatsionnaya sposobnost' vo doemov k organicheskomu veshchestvu i fosforu obshchemu [Assimilation capacity of water bodies to organic matter and phosphorus]. *Sovr. probl. gidroekol.: Tezisy dokl. IV Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati G. G. Vinberga (Sankt-Peterburg, 11–15 okt. 2010 g.)* [Modern probl. of aquatic ecol.: Abs. 4th int. sci.

ПНД Ф 14.1:2:4.139–98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций железа, кобальта, марганца, меди, никеля, серебра, хрома и цинка в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Утв. Госкомэкологией России 25.06.1998. М., 1998 (изд. 2010 г.). 22 с.

Intercomparison 0923: pH, Cond, HCO₃, NO₃-NO₂, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters Report 98/2009; NIVA-rapport 5845 / Norwegian Institute for Water Research; H. Hovind. Oslo, 2009. 73 p.

Intercomparison 1226: pH, Cond, Alk, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters report 111/2012; NIVA-rapport 6412 / Norwegian Institute for Water Research; I. Dahl. Oslo, 2012. 90 p.

Intercomparison 1428: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters report 120/2014; NIVA-rapport 6718 / Norwegian Institute for Water Research; Dr. C. Escudero-Oñate. Oslo, 2014. 88 p.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP-Waters-report 123/2015; NIVA-rapport 6910 / Norwegian Institute for Water Research; Dr. C. Escudero-Oñate. Oslo, 2015. 86 p.

Поступила в редакцию 06.02.2020

conf. to commemorate professor G. G. Winberg (Oct. 11–15, 2010, St. Petersburg, Russia)]. St. Petersburg, 2010. 108 p.

Lozovik P. A. Hidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoi-chivosti 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.

Lozovik P. A. Normirovanie dopustimoi antropogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty s ekologicheskikh i geokhimicheskikh pozitsii [Normalizing the permissible anthropogenic load on water objects from ecological and geochemical positions]. *Nauch. obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda": sb. nauch. trudov konf. (Petrozavodsk, 6–11 iyulya 2015 g.)* [Sci. support for the implementation of the Water strategy of the Russian Federation for the period up to 2020: proceed. conf. (Petrozavodsk, July 6–11, 2015)]. Petrozavodsk, 2015. P. 446–452.

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnykh nablyudenii [Nutrient load on Lake Onego according to field data]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 5. P. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Lozovik P. A. Otsenka sostoyaniya i zagryazneniya vodnykh ob'ektov i normirovanie dopustimoi antropogennoi nagruzki na nikh s uchetom protsessov, prois-

khodyashchikh v vodnoi srede [State estimation and pollution of water objects and rationing of permissible anthropogenic load with account of processes happening in aquatic environment]. *Sovr. probl. gidrokhim. i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod*: Mat. nauch. konf. s mezhdunar. uch. (Rostov-na-Donu, 8–10 sent. 2015 g.) [Modern probl. of hydrochem. and monitoring of surface water quality: Proceed. sci. conf. with int. part. (Rostov-on-Don, Sept. 8–10, 2015)]. Rostov-on-Don: Gidrokhim. in-t, 2015. P. 252–256.

Lozovik P. A., Platonov A. V. Opredelenie regional'nykh predel'no dopustimyykh kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv na primere Karel'skogo gidrograficheskogo raiona [Determination of regional maximum permissible concentrations of pollutants by the example of Karelia hydrographic region]. *Geoekol., inzhenernaya geol., gidrol., geokriologiya* [Geoecol., engineering geol., hydrol., geocryology]. 2005. No. 6. P. 527–532.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnykh vodakh [Processes of matter transformation, cycles and formation in natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 21–29.

RD 52.24.377-2008. Massovaya kontsentratsiya alyuminiya, berilliya, vanadiya, zheleza, kadmiya, kobal'ta, margantsa, medi, molibdena, nikelya, svintsa, serebra, khroma i tsinka v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii metodom atomnoi absorptsii s elektrotermicheskoj atomizatsiei prob [Mass concentration of aluminum, beryllium, vanadium, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, molybdenum, nickel, lead, silver, chromium and zinc in waters. Method of performing measurements using the atomic absorption method with electrothermal atomization of samples]. Approved by Roshydromet 25.08.2008, commissioning 01.11.2008, updating 01.01.2019. Rostov-on-Don, 2008. 29 p.

RD 52.24.449-2008. Massovaya kontsentratsiya alyuminiya v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom [Mass concentration of aluminum in waters. Method of performing measurements by photometric method]. Approved, put into operation by Roshydromet. Rostov-on-Don, 2008. 29 p.

RD 52.24.433-2005. Massovaya kontsentratsiya kremniya v poverkhnostnykh vodakh sushi. Metodika

vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom v vide zheltoi formy molibdokremnievoi kisloty [Mass concentration of silicon in the surface waters of the land. Method of performing photometric measurements in the form of yellow form of molybdenum-silicon acid]. Approved by Roshydromet 30.06.2005, commissioning 01.07.2008, updating 01.01.2019. Rostov-on-Don, 2005. 25 p.

Novikov Yu. V., Lastochkina K. O., Boldina Z. N. Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov [Methods for investigating water quality in reservoirs]. Moscow: Meditsina, 1990. 440 p.

PND F 14.1:2:4.139-98. Kolichestvennyi khimicheskii analiz vod. Metodika vypolneniya izmerenii massovykh kontsentratsii zheleza, kobal'ta, margantsa, medi, nikelya, serebra, khroma i tsinka v probakh pit'evykh, prirodnykh i stochnykh vod metodom atomno-absorbtsionnoi spektrometrii [Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring mass concentrations of iron, cobalt, manganese, copper, nickel, silver, chromium, and zinc in drinking water, natural water, and wastewater samples using atomic absorption spectrometry]. Approved by the State Committee of ecology of Russia 25.06.1998. Moscow, 1998 (ed. 2010). 22 p.

Intercomparison 0923: pH, Cond, HCO_3^- , NO_3^- - NO_2^- , Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters Report 98/2009; NIVA-rapport 5845. Norwegian Institute for Water Research; H. Hovind. Oslo, 2009. 73 p.

Intercomparison 1226: pH, Cond, Alk, NO_3^- -N, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters report 111/2012; NIVA-rapport 6412. Norwegian Institute for Water Research; I. Dahl. Oslo, 2012. 90 p.

Intercomparison 1428: pH, Conductivity, Alkalinity, NO_3^- -N, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP Waters report 120/2014; NIVA-rapport 6718. Norwegian Institute for Water Research; Dr. C. Escudero-Oñate. Oslo, 2014. 88 p.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO_3^- -N, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn: ICP-Waters-report 123/2015; NIVA-rapport 6910. Norwegian Institute for Water Research; Dr. C. Escudero-Oñate. Oslo, 2015. 86 p.

Received February 06, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лозовик Петр Александрович

Д. х. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

CONTRIBUTORS:

Lozovik, Pyotr

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

Кулик Наталья Владимировна

младший научный сотрудник лаборатории гидрохимии
и гидрогеологии

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр

«Карельский научный центр РАН»

пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

эл. почта: nadiet11@rambler.ru

Ефременко Наталья Анатольевна

главный химик лаборатории гидрохимии и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,

Федеральный исследовательский центр

«Карельский научный центр РАН»

пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

эл. почта: efremna@mail.ru

Kulik, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences

50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

e-mail: nadiet11@rambler.ru

Efremenko, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences

50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

e-mail: efremna@mail.ru

УДК 504.4.054:550.42

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СВИНЦА, СУРЬМЫ И КАДМИЯ В ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА КАРЕЛИИ

З. И. Слуковский^{1,2}, В. А. Даувальтер¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,
ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

Приведены результаты анализа накопления Pb, Sb и Cd в колонках современных отложений малых озер южной части Карелии. В число объектов исследования были включены как водоемы городской среды (Петрозаводск, Медвежьегорск, Суоярви и Сортавала), так и водные объекты, расположенные на условно фоновых территориях юга Карелии. Полевые и лабораторные исследования выполнены по единой методике в соответствии с мировым опытом проведения лимнологических работ. Определение концентраций химических элементов в озерных осадках осуществлялось с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ISP-MS. Вычислены медианные фоновые концентрации Pb, Sb и Cd в донных отложениях озер Карелии доиндустриального периода развития общества, а также установлены уровни накопления этих металлов в осадках тех же водоемов в современное (индустриальное) время. Приведены основные факторы формирования техногенных Pb-Sb-Cd-аномалий в верхних слоях донных осадков и сравнение содержания тяжелых металлов с таковым в отложениях озер других регионов мира. Вычислены уровни загрязнения карельских водоемов этими металлами на основе использования индекса геоаккумуляции I_{geo} для донных отложений озер. Согласно методике последовательной экстракции Тэсье установлены основные формы нахождения Pb, Sb и Cd в поверхностных слоях донных отложений малых озер Карелии и оценена роль органического вещества, составляющего основу самих осадков, в процессе накопления металлов. В связи с тем, что донные отложения озер южной части Карелии являются потенциальными полезными ископаемыми (сапропелями), в статье даны рекомендации о возможностях использования исследованных осадков в различных областях человеческой деятельности.

Ключевые слова: Pb; Sb; Cd; донные отложения; малые озера; антропогенное влияние; формы нахождения загрязнителей; сапропель; Республика Карелия.

Z. I. Slukovskii, V. A. Dauvalter. FEATURES OF Pb, Sb, Cd ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF SMALL LAKES IN THE SOUTH OF THE REPUBLIC OF KARELIA

The paper reports the results of the analysis of Pb, Sb, Cd accumulation in top core sediments from small lakes of southern Republic of Karelia. Both lakes in urban areas (Petrozavodsk, Medvezhyegorsk, Suojarvi, and Sortavala) and lakes in areas regarded as reference for southern Karelia were included in the study. Fieldwork and analytical investigations employed a common methodology in line with globally-accepted limno-

logical practices. The concentrations of chemical elements in the lake sediments were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The median background concentrations of Pb, Sb, Cd in the studied sediments deposited in the pre-industrial period were calculated, and the recent levels of accumulation of these metals in the industrial period were determined for the same lakes. The main factors for the formation of technogenic Pb, Sb, Cd anomalies in the top core sediments are described, and the levels of the heavy metals are compared against those in lake sediments in other parts of the world. The levels of contamination of the Karelian lakes with these metals were calculated based on the geoaccumulation index I_{geo} . The Tessier sequential extraction procedure was employed to detect the main forms of the heavy metals in the top core sediments. Especially, the role of organic matter, which constitutes the bulk of the sediments, in binding the pollutants was assessed. Considering that Karelian lake sediments are potential sources of useful organic raw material, i. e. sapropel, some recommendations are given on the possible applications of these sediments in human activities.

Keywords: Pb; Sb; Cd; sediments; small lakes; human impact; contaminant forms; sapropel; Republic of Karelia.

Введение

Эколого-геохимические исследования являются важным элементом в оценке качества окружающей среды той или иной территории. Кроме возможности выявления природных и антропогенных аномалий химических элементов в различных объектах такие работы позволяют устанавливать и прогнозировать экологические риски для живых организмов, в том числе влияние геохимических полей и аномалий на жизнь и здоровье людей [Саэт и др., 1990; Трофимов, Зиллинг, 2002; Ермаков, 2015]. Обычно в число основных задач эколого-геохимических исследований входит анализ поведения тяжелых металлов (ТМ) – источников их поступления в природу, путей миграции и механизмов закрепления в биотических и абиотических компонентах окружающей среды [Nriagu, Расуна, 1988; Моисеенко и др., 1997]. Главным образом такой интерес к ТМ вызван их реальной или потенциальной опасностью для биоты и человека.

Ключевыми объектами, в которых наиболее активно накапливаются ТМ, выступают почвы, торфяники и донные отложения (ДО) водных объектов [Håkanson, 1984; Моисеенко и др., 2000; Förstner et al., 2004; Водяницкий, 2011; Dauvalter et al., 2011; Страховенко, 2011; Янин, 2011]. В этих коллекторах существует возможность оценки современного состояния окружающей среды и исторической реконструкции природных и техногенных событий прошлого, что не исключает, а скорее подразумевает подключение других методов и подходов анализа выбранных объектов. В данной статье акцент делается на ДО озер, актуальность исследования которых в северных широтах мира велика не только из-за практической значимости из-

учения водных ресурсов в принципе, но и из-за их многочисленности. Например, на территории Карелии насчитывается свыше 60 тысяч озер, большая часть которых относится к категории малых непроточных или слабопроточных водоемов с площадью не более 1 км² [Демидов, Шелехова, 2006; Озера..., 2013].

Таким образом, целью данной работы является оценка уровня аккумуляции и форм нахождения тяжелых металлов (свинца (Pb), сурьмы (Sb) и кадмия (Cd)) в ДО малых озер южной части Карелии, включая озера урбанизированных районов и условно фоновых территорий региона.

Выбор этих трех элементов продиктован следующими соображениями:

- ранее опубликованные исследования авторов и коллег установили, что Pb и Sb являются приоритетными загрязнителями для современных ДО малых озер южной части Карелии, что особенно отчетливо проявляется на урбанизированных территориях [Слуковский и др., 2017; Слуковский, 2018; Medvedev et al., 2019; Slukovskii et al., 2020];
- существует значительный вклад в загрязнение Pb, Cd и Sb различных территорий мира, в том числе северных районов нашей страны, в результате дальнего переноса загрязнителей [Расуна, Расуна, 2001; Krachler et al., 2005; Dauvalter, Kashulin, 2010; Jernström et al., 2010; Vinogradova et al., 2017; Dauvalter, Kashulin, 2018; Виноградова, Котова, 2018; McConnell et al., 2019]. Во многих исследованиях отмечается тесная историческая связь между Pb, Cd и Sb начиная от момента выброса в атмосферу и заканчивая аккумуляцией в депонирующих средах, таких как ДО водных объектов [Kuwaе et al., 2013; Даувальтер и др., 2018];

- свинец, кадмий и сурьма входят в число высокоопасных элементов с точки зрения их влияния на живые организмы и человека [Водяницкий, 2011]. Контроль содержания этих металлов в различных средах, включая воду, – обязательное условие безопасного взаимодействия людей с природными объектами и использования природных ресурсов. Одним из примеров может служить официальный стандарт, где нормируется содержание ТМ, включая Pb и Cd, в ДО, которые могут быть использованными в сельском хозяйстве [ГОСТ Р 54000-2010].

В связи с этими предпосылками исследований, цель которых обозначена выше, предполагается решить следующие задачи:

- оценить уровень природных (фоновых) концентраций Pb, Sb и Cd в ДО малых озер южной части Карелии и провести сравнение с аналогичными данными, полученными для других регионов России и мира;
- проанализировать динамику поведения Pb, Sb и Cd в колонках верхних слоев современных ДО малых озер юга Карелии и выявить техногенное влияние на процесс обогащения этими металлами пресноводных осадков региона;

- провести оценку уровня загрязнения Pb, Sb и Cd выбранных водных объектов на основе имеющихся геохимических данных;
- установить основные формы (фракции) нахождения Pb, Sb и Cd в современных ДО малых озер южной части Карелии и оценить на основе полученных результатов потенциальные экологические риски для водной биоты озер;
- оценить роль органического вещества озер и их ДО в процессе загрязнения озер ТМ, поступающими в водную среду из окружающей среды, в том числе от антропогенных источников.

Материалы и методы

Работы по отбору проб ДО 21 малого озера южной части Карелии (рис. 1) проводились в 2016–2019 гг., как в летний, так и в весенне-зимний период. Семь исследованных озер относятся к категории урбанизированных водоемов, расположенных в черте городов Петрозаводска (озера Ламба и Четырехверстное), Медвежьегорска (озера Плотичье и Китайское), Суоярви (озера Кайпинское и Каймановское) и Сортавалы (оз. Айранне) [Слуковский, 2018]. Остальные озера расположены преимущественно в лесной или болотно-лесной мест-

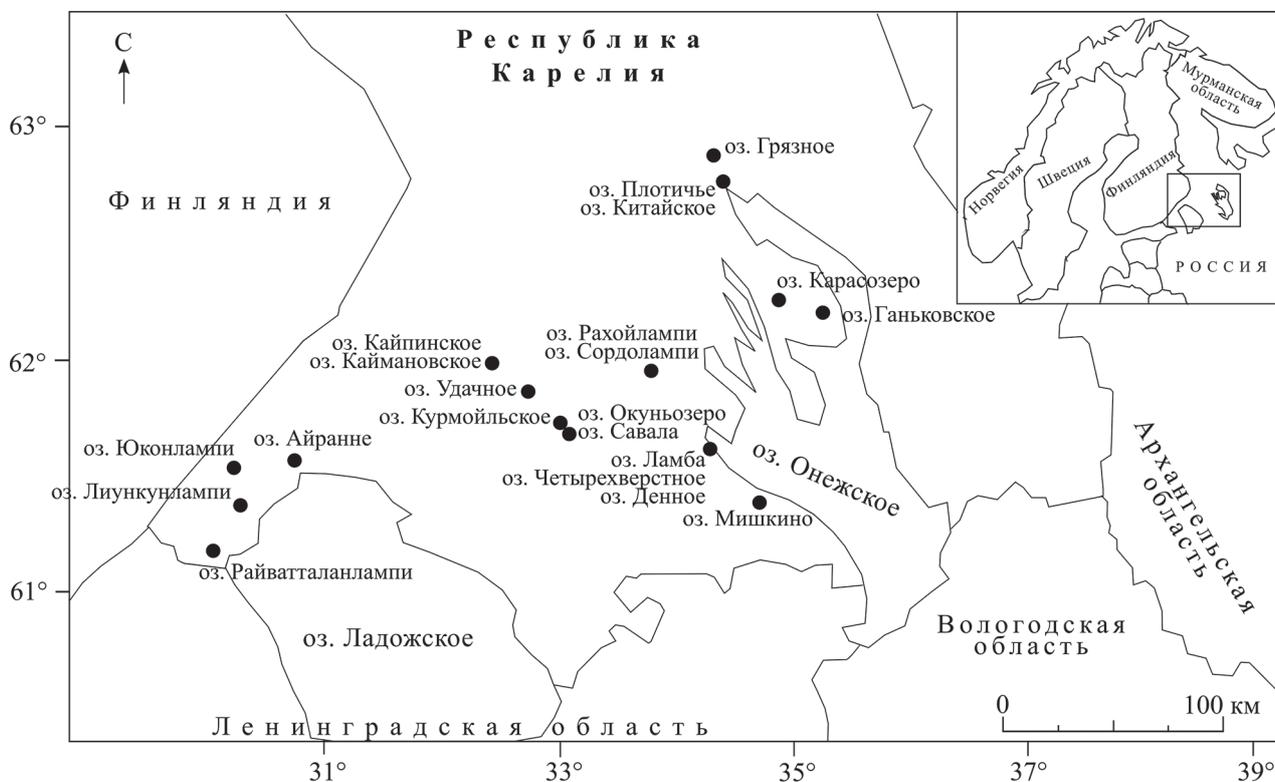


Рис. 1. Район исследований

Fig. 1. Studied area

ности на относительном удалении от крупных населенных пунктов или вблизи небольших сел или деревень, не имеющих крупных предприятий на своей территории.

Пробы ДО отбирали преимущественно пробоотборником Limnos, который позволяет получать стратифицированные колонки осадков мощностью до 60 см и разделять эти колонки на слои. В большинстве случаев полученные таким образом колонки разделяли на слои по 2 см для оценки валовых концентраций ТМ в отложениях и по 5 см для анализа различных форм нахождения металлов. Кроме этого, на озерах Ламба, Четырехверстное, Грязное, Рахойлампи, Сордолампи и Денное было проведено бурение отложений до минерального основания, алеврита или глин, подстилающих осадки. Для этого использован ручной (русский) бур, позволяющий достигать глубины 15 м, включая слой воды. Отложения озер Ганьковское, Карасозеро, Савала, Мишкино и Каймановское отобраны лишь с помощью дночерпателя Экмана – Берджа: изучен нестратифицированный слой до 20 см от поверхности ДО. Всего за четыре года отобрано 284 образца ДО с различных глубин озер. Карта расположения исследованных озер представлена на рис. 1.

Сразу после отбора пробы помещали в пластиковые контейнеры, которые подписывали и укладывали в сумку-холодильник с хладоэлементами, подготовленными к работе заранее. Далее пробы доставляли в лабораторию и помещали в холодильник, в котором они хранились при температуре около 4 °С согласно методическим рекомендациям до просушивания. Просушивание образцов проб ДО перед анализом до воздушно-сухого состояния осуществлялось при комнатной температуре, а до абсолютно сухого состояния – в сушильном шкафу при температуре около 110 °С.

Для оценки валовых концентраций элементов проводили разложение образцов ДО путем кислотного вскрытия с использованием HF, HNO₃ и HCl в открытой системе. Для анализа использовали аналитические навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1 – ГСО 7126–94). Подробно данная методика изложена в ранее опубликованной статье [Слуковский, 2015].

Для определения различных форм нахождения ТМ использовалась методика (схема) последовательного экстрагирования форм элементов в почвах [Tessier et al., 1979], включающая в себя определение: водорастворимых

форм (реагент H₂O); подвижных (обменных) форм (реагент NH₄CH₃COO); форм, связанных с гидроксидами железа и марганца (реагенты 0.04 М NH₂OH*HCl в 25% CH₃COOH); форм, связанных с органическим веществом (реагенты 0.02 М HNO₃ + 30% H₂O₂ и 3.2 М NH₄CH₃COO в 20% HNO₃); кислоторастворимых (остаточных) форм (реагент HNO₃); минеральных (силикатных) форм, получаемых в результате вычета суммы концентраций всех вышеперечисленных форм из валовых концентраций. Полный набор форм нахождения Pb, Cd и Sb был выполнен для озер Ламба, Четырехверстное, Окуньозеро, Рахойлампи, Лиункунлампи и Райватталанлампи, что в целом позволило охватить водоемы западной, восточной и центральной частей юга Карелии, а также озера условно фоновых и урбанизированных территорий (рис. 1).

Содержание Pb, Cd и Sb в пробах ДО определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific). Всего выполнено около 1000 элементоопределений. Анализ имеющихся данных с учетом эталонного образца показал, что измеренные значения концентраций, выраженных в мг/кг, характеризуются значениями относительного стандартного отклонения (RSD) от 6,3 до 16,5 %. Таким образом, уровень относительной погрешности измерений не превысил допустимых значений для всех определенных в данном исследовании химических элементов, включая ТМ [Светов и др., 2015].

Для оценки уровня загрязнения озер выбранными металлами был рассчитан индекс геоаккумуляции ТМ в ДО по следующей формуле [Müller, 1979]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C}{1.5 \times B} \right),$$

где С – валовая концентрация ТМ в исследуемом слое ДО, В – усредненная фоновая концентрация исследуемого элемента для ДО малых озер южной части Карелии.

Для оценки возраста ДО произведено определение содержания гамма-активных радионуклидов в отложениях оз. Юконлампи Лахденпохского района РК (рис. 1), которое выполнялось на кафедре радиохимии Московского государственного университета при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном, относительная эффективность 20 %. Для обработки спектров использовался программный пакет SpectralineGP.

Статистическая обработка выполнена при помощи программы Microsoft Excel 2019. Для

графической иллюстрации результатов использована бесплатная программа векторной графики Inkscape 0.48.4.

Результаты и обсуждение

Все изучаемые отложения представляют собой сапропель – самый распространенный тип озерных отложений в Карелии [Синькевич, Экман, 1995; Демидов, Шелехова, 2006]. Доля органического вещества в таких осадках колеблется от 15 до 90 %, однако в основном исследовались озера с 40–60-процентным содержанием органического вещества, что позволяет относить их к органическому или органо-силикатному типу ДО. Только ДО оз. Ламба, расположенного в черте г. Петрозаводска [Слуковский и др., 2017], относятся к органо-железистому типу ДО, также нередко встречающемуся на территории региона.

Проведенные исследования ДО 21 малого озера Карелии (рис. 1) показали, что Pb, Sb и Cd повсеместно накапливаются в водной среде на территории региона. Фоновый уровень этих металлов был оценен на основе анализа нижних слоев колонок ДО, отобранных пробоотборником Limnos, как это проделывалось в работах по территории Польши, Норвегии, Мурманской области, северной части Карелии и других районов [Håkanson, 1984; Rognerud et al., 2000; Dauvalter et al., 2011; Tylmann et al., 2011; Даувальтер, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2015]. Кроме того, в общий банк данных фоновых концентраций элементов были включены концентрации металлов, определенных в про-

бах ДО, отобранных при помощи русского бура. Возраст таких ДО, образовавшихся в промежутке между временем дегляциации территории современной Карелии и началом индустриализации стран Европы и Северной Америки, исчисляется тысячами лет [Лаврова, 2005; Субетто, 2009]. В итоге усредненное содержание Pb в фоновых слоях ДО малых озер юга Карелии составило 4,6 мг/кг, Sb – 0,17 мг/кг, а Cd – 0,41 мг/кг (табл.). При сравнении со средним составом земной коры ($Pb_{14,8}-Sb_{0,3}-Cd_{0,1}$) можно отметить, что осадки Карелии, образовавшиеся в доиндустриальное время, обеднены Pb и Sb и обогащены Cd [Wedepohl, 1995].

По сравнению с фоновыми слоями ДО малых озер других регионов России и мира фоновое содержание Pb в ДО малых озер Карелии близко к фону этого металла в осадках озер Мурманской области, но значительно меньше среднего фона Pb для севера Карелии, юга Норвегии и Скандинавских стран в целом, северной части Польши и Сибири [Страховенко, 2011; Tylmann et al., 2011; Даувальтер, Кашулин, 2015; Kashulin et al., 2017]. Доиндустриальное содержание Cd в ДО малых озер Карелии выше аналогичных данных для Мурманской области, Норвегии и Сибири [Rognerud et al., 2000; Страховенко, 2011; Dauvalter et al., 2011; Kashulin et al., 2017], близко к фону Cd для ДО польских озер [Tylmann et al., 2011] и озер севера Карелии [Даувальтер, Кашулин, 2015] и ниже, чем содержание этого металла в отложениях малых озер Скандинавских стран в целом [Håkanson, 1984]. К сожалению, оценка фона по Sb прово-

Среднее фоновое содержание Cd, Sb и Pb (в мг/кг) в ДО озер юга Карелии, Сибири и севера Европы (по литературным данным)

Average background content of Cd, Sb and Pb in lake sediments of the south of Karelia, Siberia and the north of Europe (literature review)

Регион исследования Studied area	Ссылки на литературу References	Cd	Sb	Pb
Республика Карелия (юг) Republic of Karelia (south)	Авторские данные Authors' data	0,41	0,17	4,6
Мурманская область Murmansk Region	Dauvalter et al., 2011; Даувальтер, 2012; Kashulin et al., 2017; Даувальтер и др., 2018 Dauvalter et al., 2011, 2018; Dauvalter, 2012; Kashulin et al., 2017	0,24	0,06	4,4
Скандинавские страны (в целом) Scandinavian countries (on the whole)	Håkanson, 1984	0,58	-	34,9
Сибирь Siberia	Страховенко, 2011 Strakhovenko, 2011	0,14	0,60	20,0
Польша (север) Poland (north)	Tylmann et al., 2011	0,40	-	18,7
Норвегия (юг) Norway (south)	Rognerud, Fjeld, 1993; Rognerud et al., 2000	0,26	-	24,5

дидась лишь для ДО малых озер Сибири: полученные значения намного выше новых данных по Карелии [Страховенко, 2011].

Кроме того, установлено, что среднее фоновое содержание Pb в ДО малых озер юга Карелии немного выше доиндустриального уровня этого металла в осадках Онежского озера (около 2 мг/кг) [Белкина и др., 2016], хотя в отдельных случаях эти цифры совпадают. Содержание исследованных ТМ в фоновых слоях ДО малых озер в целом выше в водоемах, относящихся к водосбору Ладожского озера. И в этом случае, и в случае сравнения фоновых концентраций ТМ в ДО озер Карелии и других регионов разница в концентрациях связана с типом отложений или с наличием специфических рудопроявлений изучаемых металлов в том или ином районе. Известно, что с увеличением доли терригенной фракции и одновременным уменьшением доли органического вещества в ДО озер возрастают концентрации многих химических элементов, например Pb и отчасти Sb [Страховенко, 2011]. Это во многом объясняет разницу в фоновых концентрациях этого металла в ДО озер Карелии, которые значительно обогащены органическим веществом, и озер более южных регионов, где велика доля кремния, алюминия и кальция в образовании озерных отложений.

Кадмий, напротив, согласно исследованиям ДО Сибири [Страховенко, 2011], лучше концентрируется в органических отложениях озер, поэтому его содержание в ДО озер Карелии доиндустриального периода выше или на одном уровне по сравнению с осадками других регионов (табл.). Более высокое фоновое содержание Cd в ДО озер юга и севера Карелии по сравнению с соседними Мурманской областью и Скандинавскими странами можно объяснить соответствующим содержанием этого металла (3 мг/кг) в коренных образованиях района исследования [Томилина и др., 2004]. Кроме того, известно, что среднее содержание Cd в верхнем почвенном горизонте района средней тайги Карелии равно 0,37 мг/кг, района северной тайги – 0,41 мг/кг, а в речных ДО самого юга Карелии, где Фенноскандинавский щит сменяется Русской платформой, содержание Cd составляет 0,39 мг/кг, и это вполне сопоставимо с данными, полученными по указанному металлу в ДО малых озер Карелии. Более того, в геохимическом атласе «Почвы Карелии» [Федорец и др., 2008] среднее содержание Cd в горизонте O составляет 0,5 мг/кг, а в горизонте E – 1,03 мг/кг.

Анализ накопления Pb, Sb и Cd в верхних слоях ДО малых озер юга Карелии выявил от-

четливое увеличение концентраций этих металлов по сравнению с нижними (доиндустриальными) слоями, содержание элементов в которых принято за природный уровень. На рис. 2–4 представлена наиболее типичная динамика поведения Pb, Sb и Cd в колонках осадков десяти из всех исследованных озер. Наибольшее накопление Pb отмечается в ДО городских озер Ламба (Петрозаводск, до 140 мг/кг) и Плотичье (Медвежьегорск, до 155 мг/кг), а также озер Лиункунламп (до 86 мг/кг) и Юконламп (до 92 мг/кг) (рис. 2). Причем в ДО оз. Ламба максимальное накопление Pb приходится не на верхние 10–20 см, а на глубину от 20 до 30 см. Кроме того, высокий уровень накопления этого металла по отношению к фону отмечается в оз. Четырехверстном, расположенном на окраине г. Петрозаводска, и оз. Денном, расположенном в 3 км от города. То есть отмечается значительное влияние самого крупного города Карелии на загрязнение Pb озер внутри и вблизи него. Медианное содержание Pb в верхних слоях ДО всех озер составляет 32,7 мг/кг, только городских озер – 41,8 мг/кг, только озер условно фоновых районов юга Карелии – 31,2 мг/кг.

Наибольшее накопление Sb снова отмечается в ДО городских озер: до 4,48 мг/кг в оз. Плотичьем, до 3,90 мг/кг в оз. Ламба и до 2,92 мг/кг в оз. Четырехверстном (рис. 3). Кроме них большой уровень накопления этого металла отмечен в осадках оз. Удачного (до 2,17 мг/кг), расположенного в отдалении от урбанизированных территорий. Несмотря на этот факт, в целом Sb накапливается более интенсивно в ДО озер в городской среде: медиана для озер урбанизированных территорий составляет около 0,95 мг/кг против 0,68 мг/кг – значения, рассчитанного для всех исследованных озер юга Карелии, и 0,69 мг/кг – значения, рассчитанного только для озер условно фоновых территорий. Так же как и в случае с Pb в ДО оз. Ламба (Петрозаводск), Sb имеет пики концентраций не в самых верхних слоях, а ниже по исследованной колонке – на глубине 18–28 см. В целом этот ТМ ведет себя схоже с поведением Pb во всех водоемах, что отражается на тесной корреляции металлов: $r = 0,84$ (при $p < 0,01$).

Третий из исследованных металлов, Cd, имеет наибольшее накопление в ДО озер Юконламп (до 2,69 мг/кг), Лиункунламп (до 2,05 мг/кг) и Райватталанламп (до 1,98 мг/кг), оз. Плотичьем, расположенном в г. Медвежьегорске (до 2,03 мг/кг) и оз. Удачном (до 1,72 мг/кг) (рис. 4). Согласно расчету медианных значений концентраций этого ТМ в верх-

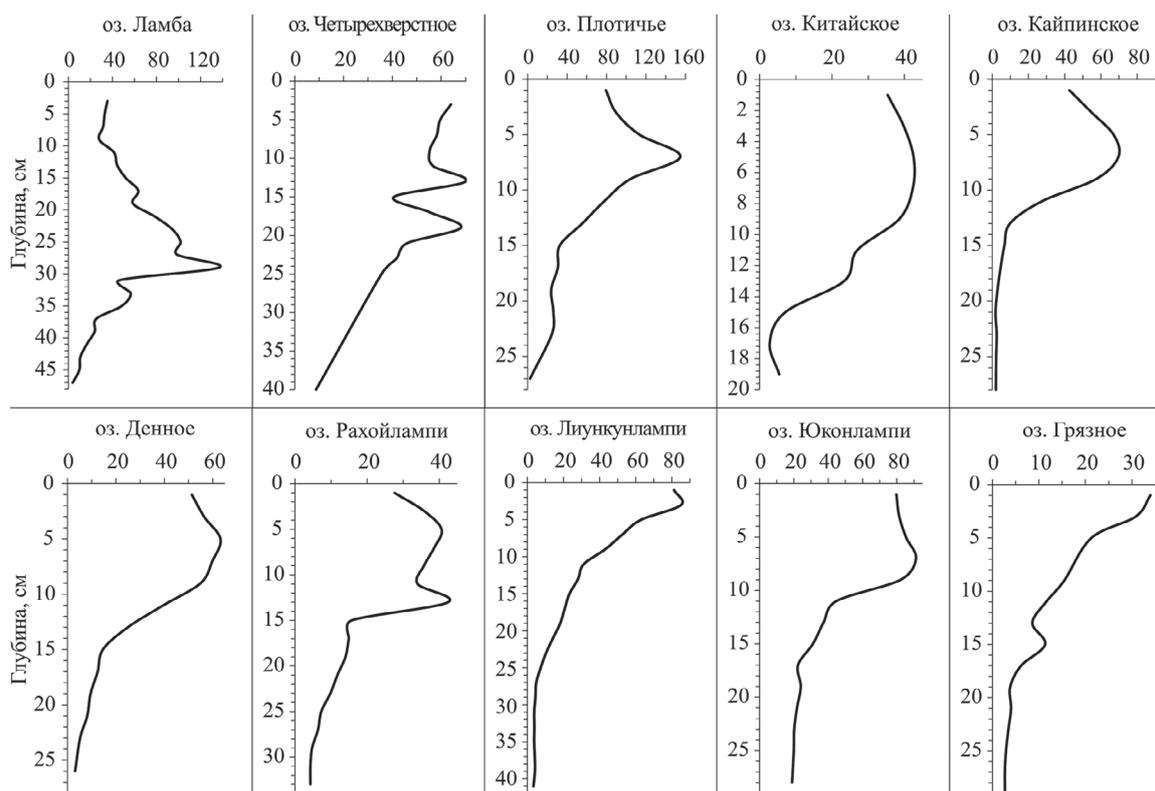


Рис. 2. Вертикальное распределение Pb (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 2. Vertical distribution of Pb (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

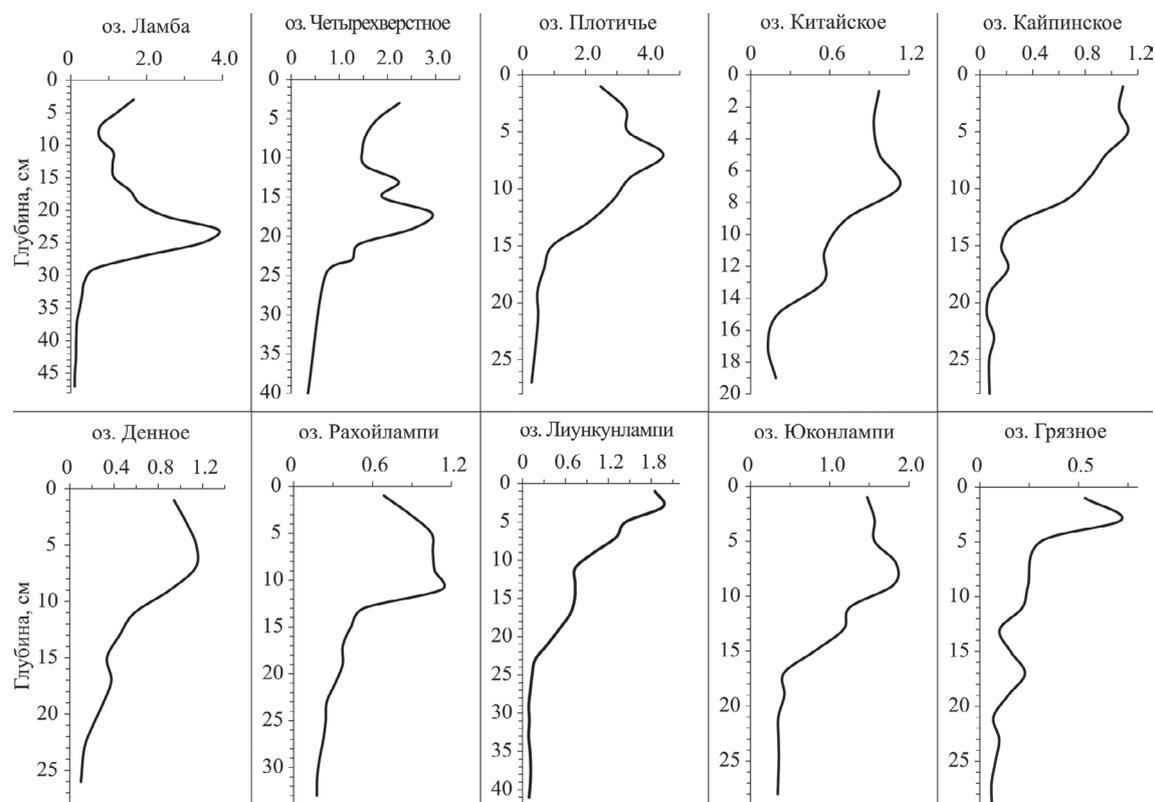


Рис. 3. Вертикальное распределение Sb (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 3. Vertical distribution of Sb (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

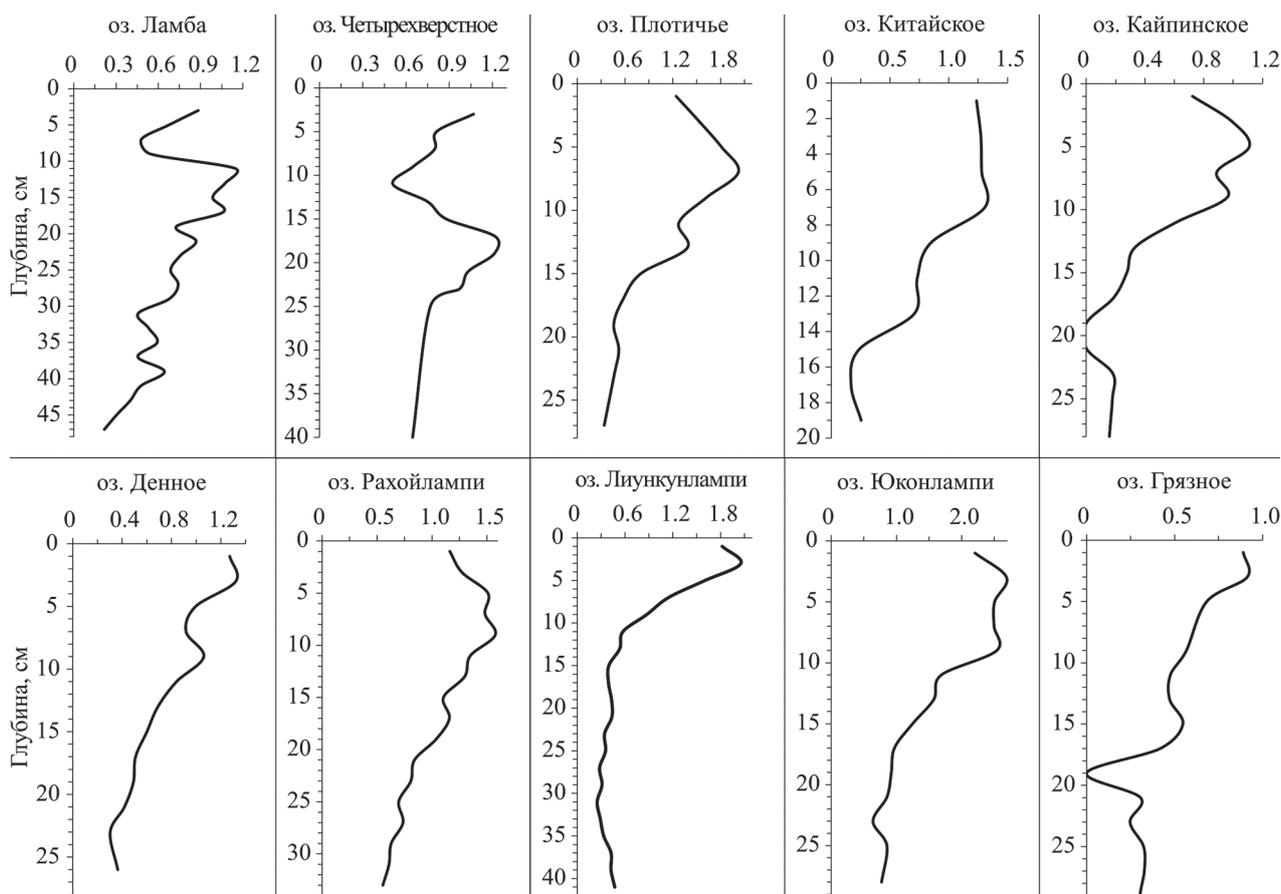


Рис. 4. Вертикальное распределение Cd (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 4. Vertical distribution of Cd (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

них слоях ДО озер только урбанизированных территорий (0,82 мг/кг) и только озер условно фоновых районов (1,08 мг/кг), очевидно, что Cd более интенсивно накапливается в отдаленных от городов Карелии районах. При этом медианное содержание Cd в верхних слоях отложений для всех изученных водоемов (0,84 мг/кг) близко к цифре, полученной только для урбанизированных территорий. Кадмий тесно коррелирует с Sb ($r = 0,55$ при $p < 0,01$) и Pb ($r = 0,61$ при $p < 0,01$), однако эти коэффициенты корреляции несколько ниже уровня корреляции в паре Pb-Sb, что можно объяснить фактором городской среды при формировании геохимических ассоциаций в современных ДО малых озер Карелии. Ранее отмечалось, что для водоемов городов Карелии более типичные загрязнители – Pb и Sb [Слуковский, 2018].

Возраст исследованных современных отложений малых озер юга Карелии был оценен по нескольким параметрам. Во-первых, оценка абсолютного возраста ДО оз. Юконлампи (юго-запад региона) по изотопам Pb-210 и Cs-137 с параллельным определением концентраций

Tm показала, что рост концентраций Pb, Cd и Sb в отложениях водоема датируется началом XX века (рис. 5). При этом наиболее заметное увеличение элементов отмечается в послевоенное время. Средняя скорость седиментации в оцененный период в оз. Юконлампи, согласно данным датирования, получается 1,25 мм/год. Аналогичные скорости седиментации отмечаются в южных районах Финляндии, Швеции и Норвегии, а также в Мурманской области [Håkanson, 1984; Verta et al., 1998; Rognerud et al., 2000; Даувальтер, 2012; Даувальтер и др., 2015]. Во-вторых, принимая во внимание, что процесс накопления металлов в разных озерах юга Карелии, как показано на графиках рис. 2, 3 и 4, происходил по единой модели, допустимо предполагать, что слои ДО, наиболее обогащенные Pb, Cd и Sb, также имеют возраст 100–120 лет. В-третьих, ранее проводимые детальные исследования ДО оз. Ламба, расположенного вблизи Петрозаводской ТЭЦ, работающей на мазуте, выявили геохимический маркер для оценки возраста ДО [Слуковский и др., 2017; Слуковский, 2018]. Этим марке-

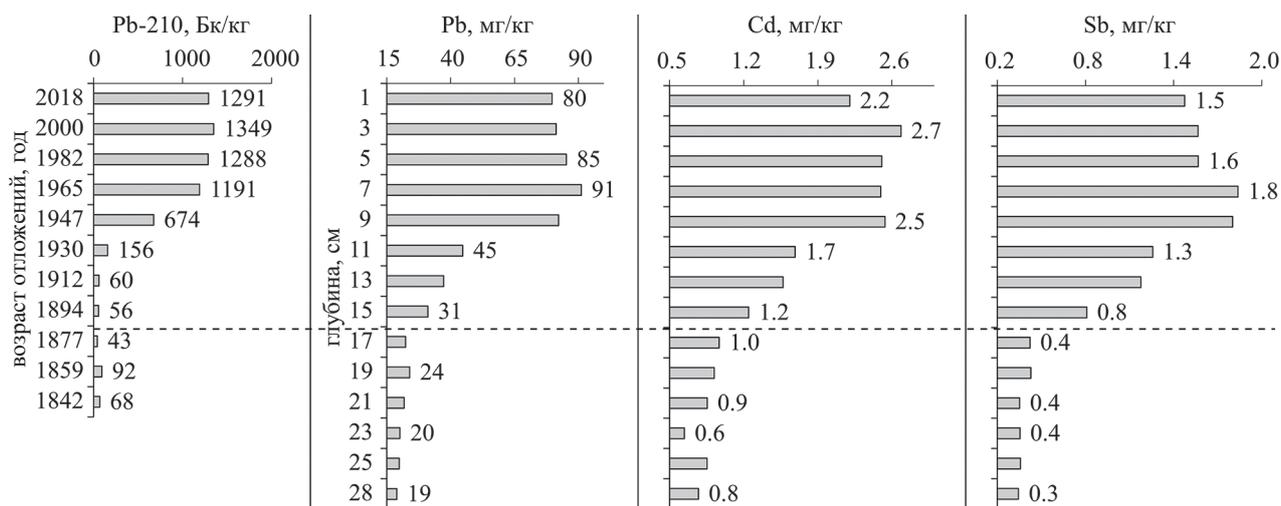


Рис. 5. Вертикальное распределение изотопа Pb-210, Pb, Sb и Cd в ДО оз. Юконлампи

Fig. 5. Vertical distribution of isotope of Pb-210, Pb, Sb and Cd in the sediments of Lake Ukonlampi

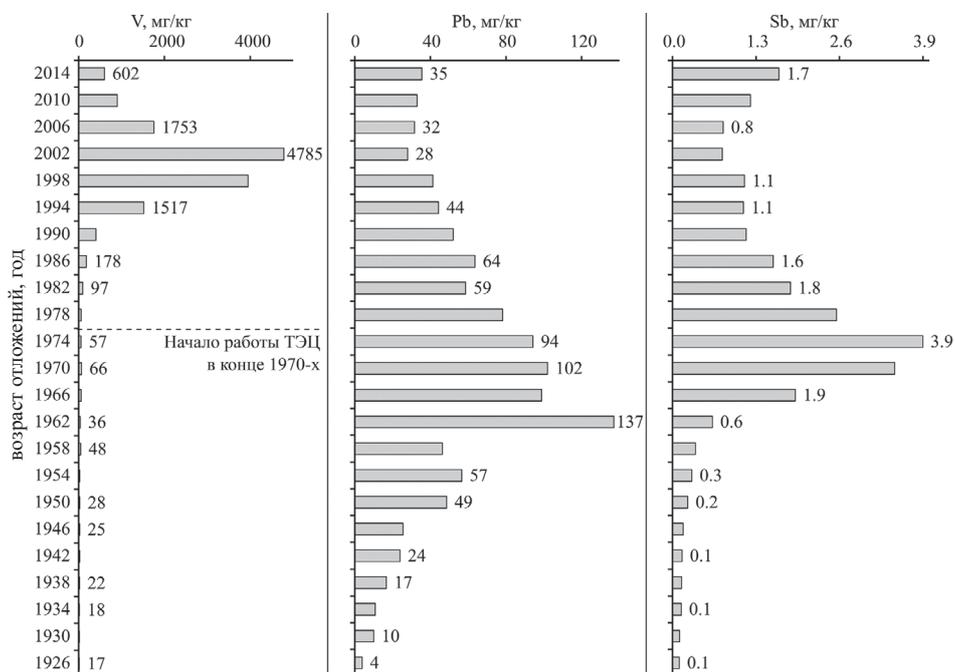


Рис. 6. Вертикальное распределение V, Pb и Sb в ДО оз. Ламба (Петрозаводск)

Fig. 6. Vertical distribution of V, Pb and Sb in the sediments of Lake Lamba (Petrozavodsk)

ром служит ванадий (V) в самых верхних слоях ДО озера, так как этот ТМ является типичной примесью мазута. Рост и снижение концентраций V в слоях от 22 до 0 см маркировали начало работы ТЭЦ в конце 1970-х годов и переход предприятия на природный газ в начале 2000-х (рис. 6). Исходя из этой оценки возраста, «пики» Pb и Sb в ДО оз. Ламба соответствуют середине XX века, а возраст всей колонки изученных озерных осадков составляет около 95 лет при средней скорости седиментации около 3,8 мм/год. Однако данная цифра – это скорее исключение, чем правило, и в среднем

по анализу всех изученных колонок ДО озер юга Карелии можно говорить о скорости седиментации, близкой к 1,25 мм.

Показанные закономерности накопления Pb, Cd и Sb в верхних слоях ДО исследованных озер юга Карелии – типичное поведение загрязнителей окружающей среды севера России и мира. При этом наиболее часто в научной литературе встречается анализ поведения лишь Pb и Cd. Показанные закономерности накопления Pb и Cd находят отражение в исследованиях озерных отложений на территории Мурманской и Архангельской областей, Финляндии, Нор-

вегии, Швеции, Швейцарии, Латвии, Польши, США, Китая, Японии и других стран и регионов [Keinonen, 1992; Rognerud, Fjeld, 1993; Birch et al., 1996; Моисеенко и др., 1997; Verta et al., 1998; Virkutyte et al., 2008; Dauvalter, Kashulin, 2010; Jernström et al., 2010; Даувальтер, 2012; Stankevica et al., 2012; Escobar et al., 2013; Liu et al., 2013; Kuwae et al., 2013; Масленникова и др., 2014; Стародымова и др., 2016; Hosono et al., 2016]. В большинстве случаев «пики» Pb и Cd приходятся не на самые верхние слои отложений, а на слои от 5 до 20 см, датированные временем с середины до конца XX века.

Основным поставщиком изученных металлов в водные объекты служит воздушный перенос, как от местных источников загрязнения, так и от источников загрязнения, расположенных на значительных расстояниях от изучаемых озер [Bartnicki, 1994; Vinogradova et al., 2017; Виноградова, Котова, 2018]. Иногда эти расстояния могут исчисляться сотнями и первыми тысячами километров. Как отмечается в многочисленных работах по изучению поведения ТМ в окружающей среде, в начале эры индустриального развития общества главными источниками Pb, Cd, Sb и некоторых других элементов служили выбросы от сжигания ископаемого угля [Расуна, Расуна, 2001; Krachler et al., 2005; McConnell, Edwards, 2008; McConnell et al., 2019]. Причем тренды поведения этих элементов совпадают начиная с конца XIX века до настоящего времени. Кроме этого, металлы поступали и поступают в атмосферу в результате деятельности предприятий по добыче и переработке руд металлов и сжигания бытовых отходов [Cooke, Abbott, 2008; Kuwae et al., 2013]. Специфическим источником поступления Pb в окружающую среду городов и прилегающих к ним территорий по всему миру стали с 1930-х по начало 2000-х годов выбросы автомобильного транспорта, так как соединение тетраэтилсвинец $Pb(CH_3CH_2)_4$ в этот период использовалось в качестве антидетонирующей присадки в бензин [Thomas, 1995; Komárek et al., 2008]. Частично к маркерам влияния автотранспорта можно отнести и Cd, который входит в состав шин и тормозных колодок, хорошо изнашиваемых в процессе эксплуатации машин. Также Pb и Cd широко применяются в производстве аккумуляторов, которые используются в работе различных транспортных средств, включая городской транспорт. Во всех работах, проводимых в Европе или Северной Америке на основе изучения ледяных или торфяных кернов и колонок ДО, отмечается рост концентраций Pb, Cd и Sb до конца XX столетия и затем снижение концентраций ТМ, вызванное

снижением уровня производственных мощностей предприятий, экологизации производств вследствие введения в западных странах строгих норм для атмосферных выбросов и переноса индустриальных комплексов в страны Юго-Восточной Азии, где, напротив, отмечается рост концентраций металлов в воздухе и различных депонирующих средах в конце XX – начале XXI веков [Liu et al., 2013; Kuwae et al., 2013; Hosono et al., 2016].

Таким образом, все описанные процессы поступления ТМ, включая Pb, Cd и Sb, происходили как раз во время формирования исследованных в данной работе современных озерных ДО Карелии, что и нашло отражение в их геохимической специфике. Можно уверенно констатировать, что ДО индустриального периода малых озер юга республики в среднем значительно обогащены Pb, Cd и Sb (медиана для всех озер соответственно 32,7; 0,84 и 0,68 мг/кг) по сравнению с кларком для верхней части земной коры ($Pb_{14,8}-Sb_{0,3}-Cd_{0,1}$). Безусловно, в крупнейших городах и более индустриально развитых регионах страны и мира и соседних с ними районах современные озерные отложения в значительно большей степени обогащаются изученными металлами. Так, в крупных горнопромышленных районах Перу (Южная Америка) из-за разработок руд, содержащих Pb, Sb, Cd и другие элементы, осадки пресноводных озер, расположенных вблизи предприятий, обогащены Pb до 2500 мг/кг, Cd – до 30 мг/кг и Sb – до 15 мг/кг [Cooke, Abbott, 2008]. В другом крупном индустриально развитом районе, вблизи Карабашского медеплавильного завода (г. Карабаш, Челябинская область), отмечаются экстремальные содержания Pb в верхних слоях ДО до 2000 мг/кг, что в 200 раз выше фоновых для региона. Содержание другого металла, Cd, в этих же отложениях в 220 раз превышает содержание этого элемента в осадках доиндустриального времени [Удачин и др., 2009].

В более близком к Карелии индустриально развитом регионе – Мурманской области крайне высокие значения по Cd можно отметить в ДО оз. Нюдъявр (до 19 мг/кг), принимающего стоки и атмосферные выбросы медно-никелевого комбината вблизи г. Мончегорска [Даувальтер, Кашулин, 2011; Слуковский, Даувальтер, 2019]. Максимальные концентрации Pb (до 130 мг/кг) в осадках этого озера в целом близки к тем значениям, которые получены для городских озер Карелии [Слуковский, 2018]. Описанные примеры экстремально высоких концентраций Pb, Cd и Sb в осадках озер, расположенных вблизи действующих производств,

хорошо иллюстрируют мощность заводских выбросов, с которыми также напрямую связан эффект дальнего переноса поллютантов. Только на отдалении в десятки и сотни километров от выбросов концентрации ТМ в ДО, естественно, становятся значительно ниже. На большей части территории Южной Карелии мы как раз наблюдаем отголоски выбросов различных производственных комплексов соседних регионов в виде аномалий Pb, Cd и Sb в ДО озер, описанных выше. Согласно анализу современного атмосферного переноса ТМ на территорию Карелии, в основном окружающая среда региона испытывает влияние предприятий Мурманской и Ленинградской областей, г. Санкт-Петербурга и ряда стран северо-востока Европы [Виноградова, Иванова, 2013]. Однако в южной части Норвегии, расположенной на одной широте с южной частью Карелии, в самых верхних слоях ДО (0–1 см) содержание Pb в среднем в 3 раза выше, чем в аналогичных слоях ДО российского региона [Rognerud et al., 2000], что можно объяснить большей близостью к Норвегии действующих и недействующих предприятий на территории Западной Европы, нежели к Карелии. С другой стороны, аналогичные сравнения по Cd приводят к обратному результату – его содержание в 2 раза выше в современных ДО Карелии. Во многом это объясняется большим содержанием этого металла в доиндустриальных слоях ДО малых озер юга Карелии по сравнению с соседним регионом.

Согласно расчету индекса геоаккумуляции по каждому металлу, в каждом из исследованных озер Карелии (брались усредненные значения по слоям ДО от 0 до 20 см, а для оз. Ламба дополнительно от 20 до 40 см) высоким уровнем загрязнения Pb характеризуются озера Плотичье ($I_{\text{geo}} = 3,51$), Ламба ($I_{\text{geo}} = 3,27$), Юконлампи ($I_{\text{geo}} = 3,12$) и Четырехверстное ($I_{\text{geo}} = 3,08$), то есть в основном водоемы городов республики. Как отмечалось ранее, на экосистему оз. Юконлампи, расположенного среди лесного массива, также влияет городская среда, только в результате дальнего переноса загрязнителей со стороны г. Санкт-Петербурга [Slukovskii et al., 2020]. Умеренный или высокий уровень загрязнения Pb (I_{geo} от 2 до 3) испытывают озера Денное, Окуньозеро, Удачное, Райватталанлампи, Лиункунлампи, Айранне, Кайпинское, Каймановское, Китайское, Карасозеро, Ганьковское и Рахойлампи. Учитывая тесную корреляцию между Pb и Sb в ДО малых озер Карелии, отмеченную ранее, несложно понять, что примерно те же закономерности по уровню загрязнения установлены и для сурь-

мы. Наиболее высокий уровень загрязнения Sb ($I_{\text{geo}} = 3,43$) установлен для оз. Плотичье (г. Медвежьегорск). Уровень чуть ниже (I_{geo} от 2 до 3) – для следующих озер: Четырехверстное, Каймановское, Удачное, Юконлампи и Ламба. В остальных случаях выявлены уровни загрязнения от умеренного и ниже. Что касается третьего исследованного металла, Cd, ни в одном водоеме не установлено загрязнение по I_{geo} выше умеренного уровня. Наибольшие величины I_{geo} (от 1 до 2) отмечены лишь в озерах Юконлампи, Райватталанлампи, Удачное, Плотичье, Рахойлампи и Ганьковское. Как можно заметить, в основном это водоемы условно фоновых территорий Южной Карелии. В остальных озерах, включая водоемы урбанизированных территорий, величины I_{geo} ниже 1.

Данные оценки уровня загрязнения озер по I_{geo} созвучны с оценкой пригодности изученных ДО (сапропелей) водоемов юга Карелии в качестве удобрения для нужд сельского хозяйства. Согласно [ГОСТ Р 54000-2010], содержание Pb не должно превышать 50 мг/кг сухого веса для сапропелей 1-го класса пригодности. В этом отношении превышения выявлены лишь для самых загрязненных водоемов – городских малых озер Ламба, Четырехверстное, Плотичье, Денное и Кайпинское, а также озер Лахденпохского района Юконлампи и Лиункунлампи, ближе всех расположенных к источникам дальнего переноса ТМ со стороны стран Западной Европы (рис. 1). Однако и в этом случае угрозу представляют лишь самые верхние слои осадков – до 40 см максимум. Учитывая, что при поиске и освоении сапропелевых месторождений выбор делается в пользу озер с мощностью ДО от 2 метров и выше, самые верхние слои, составляющие первые проценты от всей мощности отложений, можно удалить или не затрагивать при добыче полезного ископаемого. Следует добавить, что по Cd превышений установленной в ГОСТе нормы для сапропелевых отложений, составляющей 3 мг/кг для 1-го класса пригодности, не выявлено ни в одном из изученных малых озер южной части Карелии. При этом в случае оценки пригодности какого-либо из этих водоемов для добычи сапропеля нужно проводить оценку содержания в ДО и других ТМ, а также других (биологических и химических) компонентов озерных отложений.

Принимая во внимание, что наибольшая ценность в таких сапропелевых отложениях принадлежит органическому веществу, с точки зрения экологии важно было провести оценку связи Pb, Cd и Sb именно с этим компонентом ДО, а также выявить уровень подвижности

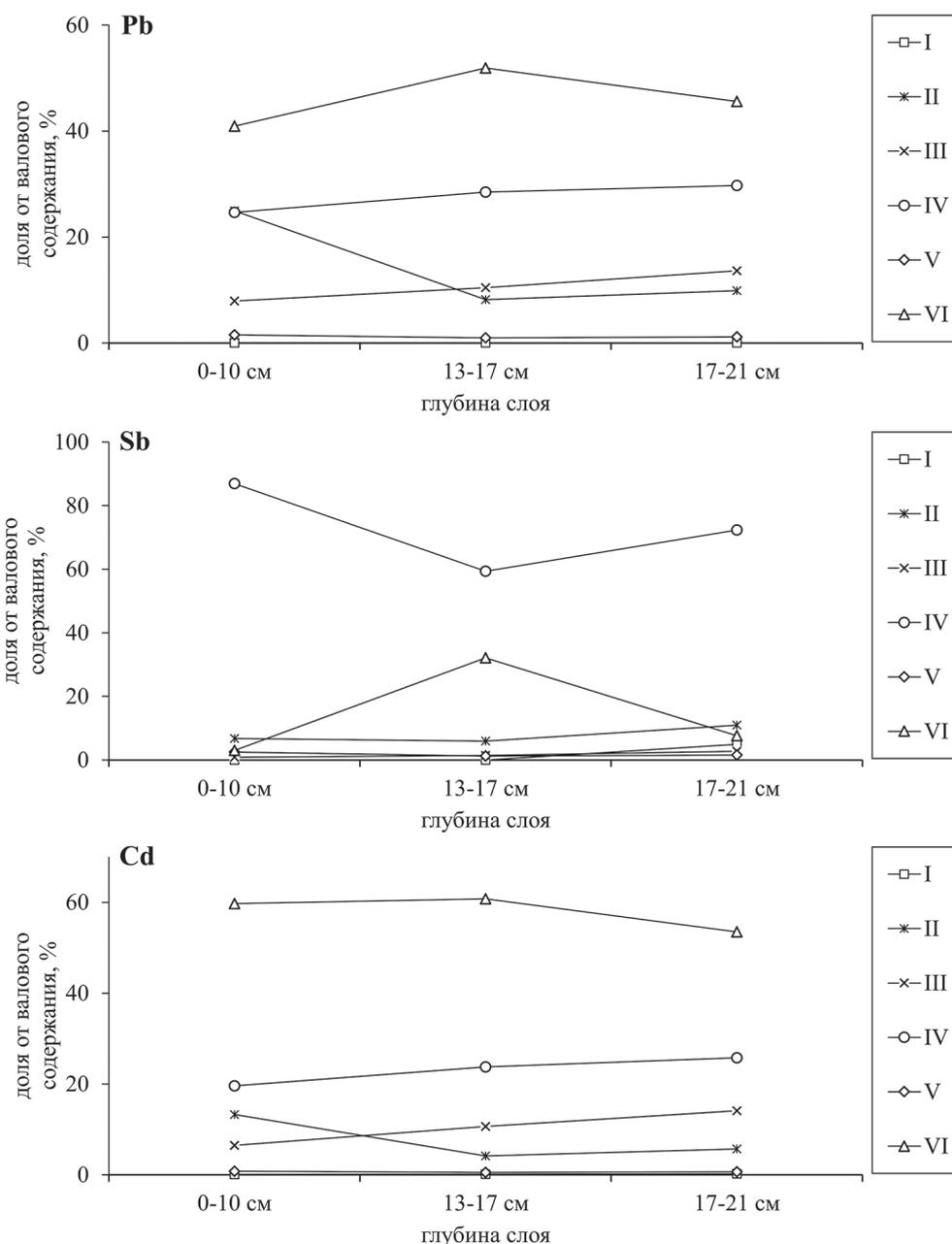


Рис. 7. Распределение форм нахождения Pb, Sb и Cd в ДО оз. Окуньозеро:

I – водорастворимые формы, II – обменные катионы (подвижные формы), III – формы, связанные с гидроокислами Fe и Mn, IV – формы, связанные с органическим веществом, V – кислото-растворимые (остаточные) формы, VI – минеральные формы

Fig. 7. Distribution of Pb, Sb and Cd forms in the sediments of Lake Okunozero:

I – water-soluble fractions, II – available (mobile) fractions, III – fractions bound to Fe and Mn hydroxides, IV – fractions bound to organic matter, V – acid-soluble (residual) fractions, VI – mineral (silicate) phase

указанных ТМ. Так, было установлено, что преимущественно металлы связаны с минеральными фазами ДО и с органическим веществом и в меньшей степени – с соединениями Fe. Например, в озере Окуньозеро Pb более тяготеет к минеральной фазе (41–52 % от валового содержания). В меньшей степени этот металл

связан с органическим веществом ДО водоема (25–30 %). Примерно так же ведет себя и Cd в ДО оз. Окуньозеро (рис. 7). Отмечается рост подвижных форм Pb и Cd в слое отложений 0–10 см, что может представлять потенциальную опасность для водной биоты. С другой стороны, установлена слабая подвижность Sb

в этих же ДО оз. Окуньозеро, однако в отличие от Pb и Cd сурьма преимущественно накапливается в органической составляющей отложений (59–87 % от валового содержания металла). Это необходимо учитывать при возможной добыче сапропеля этого озера, принимая во внимание также тот факт, что в ГОСТе не нормируется содержание Sb.

В остальных озерах, где была изучена принадлежность ТМ к той или иной форме нахождения, также отмечается значительная связь Pb, Cd и Sb с минеральной и органической фазой ДО. В отдельных случаях установлена более или менее значительная роль соединений Fe при аккумуляции в ДО озер Pb (Четырехверстное, Лиункунлампи, Райватталанлампи), Cd (Ламба, Четырехверстное, Лиункунлампи, Райватталанлампи) и Sb (только оз. Райватталанлампи). Однако в среднем роль соединений Fe невелика, что выражается в 5–12 % от валового содержания того или иного металла. Почти во всех озерах выявлены подвижные формы Cd (9–35 % от валового содержания) в самых верхних слоях ДО. Наибольшая подвижность этого металла отмечена в городских озерах Ламба и Четырехверстное и озерах Лиункунлампи и Райватталанлампи. В последних двух водоемах отмечена также роль подвижных форм Pb (25–50 % от валового содержания) в формировании геохимической специфики ДО. О степени экологических последствий такого поведения ТМ для изученных водоемов можно будет судить в дальнейших эколого-геохимических исследованиях малых озер Карелии и всего Северо-Запада России.

С учетом полученных результатов по формам нахождения ТМ, где стоит отметить большое значение органического вещества при сорбции Pb, Cd и Sb и подвижных форм металлов (в первую очередь Cd), необходимо более серьезно оценивать экологическую роль изученных металлов, принимая во внимание, что именно органическая и подвижная формы в большей степени отвечают за миграцию загрязнителей из среды ДО в живые организмы, для которых осадки озер являются местом обитания и питания [López et al., 2010; Moiseenko, 2015]. В дальнейшем живые организмы, в частности рыбы, могут стать объектами питания людей, особенно когда речь идет о городских малых озерах, активно используемых летом и зимой местным населением в рекреационных целях [Vierikko, Yli-Pelkonen, 2019]. Современные темпы развития городских территорий, в том числе в северных регионах, создают необходимые предпосылки для разработки самых серьезных мер по улучшению качества го-

родской среды и современного прогрессивного менеджмента для поддержания достигнутых результатов на высоком уровне в настоящем и будущем.

Заключение

В результате проведенных исследований толщи современных ДО малых озер юга Карелии установлено среднее фоновое содержание высокотоксичных халькофильных элементов Pb, Cd и Sb, равное 4,6; 0,41 и 0,17 мг/кг соответственно. По сравнению с кларками земной коры фоновые (доиндустриальные) слои озерных осадков Карелии обеднены Pb и Sb и обогащены Cd. Сопоставление установленных величин фонового содержания Pb, Cd и Sb в ДО малых озер юга Карелии и других районов севера Европы и Сибири выявило схожесть либо расхождение, отражающие природные особенности накопления озерных донных отложений. В верхних слоях ДО озер различных районов Карелии отмечается отчетливое увеличение концентраций Pb, Cd и Sb (до 140; 2,7 и 4,5 мг/кг соответственно) по сравнению с нижними фоновыми слоями. Наибольшее накопление этих элементов обычно происходит не в поверхностном слое ДО, а на глубинах приблизительно от 5 до 30 см, что по времени осадконакопления совпадает с максимальным уровнем выбросов загрязняющих веществ в Карелии и Европе в целом с середины до конца XX века. Уменьшение концентраций Pb, Sb и Cd в поверхностных слоях ДО озер юга Карелии вызвано снижением уровня производственных мощностей предприятий после распада СССР, запретом производства этилированного бензина, введением в западных странах строгих норм для атмосферных выбросов и перенесением промышленного производства с высоким уровнем выбросов загрязняющих веществ в страны Юго-Восточной Азии. Установлено значительное обогащение Pb, Cd и Sb (от 2 до 8 раз) ДО индустриального периода малых озер юга республики (медиана для всех озер соответственно 32,7; 0,84 и 0,68 мг/кг) по сравнению с фоновыми значениями и кларком земной коры. Высоким и умеренным уровнем загрязнения Pb, Sb и Cd согласно расчету индекса геоаккумуляции характеризуются в основном водоемы городов Карелии. Анализ форм нахождения исследуемых элементов в ДО озер Карелии выявил, что они преимущественно связаны с минеральными фазами и органическим веществом. В меньшей степени Pb, Sb и Cd в ДО находятся в формах, связанных с гидроксидами Fe и Mn, и обменных формах, что может

представлять потенциальную опасность для гидробионтов при изменении физико-химических условий (например, pH, Eh, минерализации) в водной толще и ДО озер. Вследствие большого содержания органического вещества и значительной мощности ДО озер южной части Карелии являются потенциальными полезными ископаемыми (сапропелями) и могут быть использованы в качестве удобрения для нужд сельского хозяйства. Высокие и умеренные уровни загрязнения ДО выявлены главным образом в городских водоемах, поэтому сапропели озер, удаленных от промышленных и городских центров на несколько десятков километров, могут рекомендоваться для сельскохозяйственного использования. Можно также рекомендовать использование сапропелей озер, находящихся вблизи промышленных и городских центров, но с условием удаления верхних (до 40 см) слоев, содержащих в себе повышенные концентрации загрязняющих элементов.

Авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам А. С. Медведеву, Е. В. Сыроежко, Д. Г. Новицкому и М. А. Медведеву за помощь в отборе проб ДО озер, а также О. П. Корытной, А. С. Парамонову, С. В. Бурдюху, М. В. Эховой и В. Л. Утициной за качественное проведение аналитических исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00897), а также в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Литература

- Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3(83). С. 135–139.
- Виноградова А. А., Котова Е. И. Вклады источников Европы в загрязнение свинцом и кадмием северных районов Европейской России // Живые и биокосные системы [Электронный ресурс]. 2018. № 23. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-23/article-2> (дата обращения: 03.12.2019).
- Виноградова А. А., Иванова Ю. А. Загрязнение воздушной среды в центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 5. С. 98–108.
- Водяницкий Ю. Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюлл. Почв. ин-та. 2011. № 68. С. 56–82.
- ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия».
- Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах севера европейской части России. Мурманск: МГТУ, 2015. 136 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Эколого-экономическая оценка необходимости извлечения донных отложений оз. Нюдъявр Мончегорского района Мурманской области // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 884–891.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 62–75. doi: 10.17076/lim40
- Даувальтер В. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Удачин В. Н., Филиппова К. А., Борисов А. П. Реконструкция загрязнения территории полуострова Рыбачий Мурманской области тяжелыми металлами // Труды ФНС. 2018. № 15. С. 441–444. doi: 10.31241/FNS.2018.15.112
- Демидов И. Н., Шелехова Т. С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.
- Лаврова Н. Б. Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2005. № 8. С. 143–148.
- Масленникова А. В., Удачин В. Н., Дерягин В. В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 136 с.
- Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П., Каган Л. Я., Ильяшук Е. А. Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки // ДАН. 2000. № 1. С. 115–118.
- Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Родюшкин И. В. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 127 с.
- Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова и В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасов А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Светов С. А., Степанова А. В., Чаженина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный геохимический (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140
- Синькевич Е. И., Экман И. М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

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

Слуковский З. И. Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды (Республика Карелия) // Водное хозяйство России. 2018. № 6. С. 70–82.

Слуковский З. И., Даувальтер В. А. Морфология и состав техногенных частиц донных отложений оз. Нюдъявр, Мурманская область // Записки РМО. 2019. № 3. С. 102–117. doi: 10.30695/zrmo/2019.1483.102–117

Слуковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 10. С. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Стародымова Д. П., Шевченко В. П., Кокрятская Н. М., Алиев Р. А., Бычков А. Ю., Забелина С. А., Чулаков А. В. Геохимия донных осадков малого озера (водосбор Онежского озера, Архангельская область) // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 172–177.

Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2011. 24 с.

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

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

Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002. 415 с.

Удачин В. Н., Дерягин В. В., Китагава Р., Аминов П. Г. Изотопная геохимия донных отложений озер Южного Урала для оценки масштабов горно-промышленного техногенеза // Вестник ТГУ. 2009. № 3. С. 144–149.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.

Янин Е. П. Формы нахождения кадмия в техногенных илах реки Пахры и оценка его миграционных способностей. География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 42–46.

Bartnicki J. An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results // Water Air Soil Pollut. 1994. Vol. 75(3-4). P. 227–263. doi: 10.1007/BF00482939

Birch L., Hanselmann K. W., Bachofen R. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments: Historical records of anthropogenic emissions in a meromictic al-

pine lake // Water Res. 1996. Vol. 30, iss. 3. P. 679–687. doi: 10.1016/0043–1354(95) 00231–6

Cooke C. A., Abbott M. B. A paleolimnological perspective on industrial-era metal pollution in the central Andes, Peru // Sci. Total Environ. 2008. Vol. 393. P. 262–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.034

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of the Arctic freshwater system based on concentrations of heavy metals in the bottom sediments // Geochem. Int. 2018. Vol. 56, no. 8. P. 842–856. doi: 10.1134/S0016702918080037

Dauvalter V., Kashulin N. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in Lake Umbozero, Murmansk Province // Water Res. 2010. No. 37. P. 497–512.

Dauvalter V., Kashulin V., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // J. Environ. Sci. Health A Tox Hazar. 2011. Vol. 46. P. 1020–1033.

Ermakov V. V. Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons // Geochem. Int. 2015. Vol. 53, no. 3. P. 195–212. doi: 10.1134/S0016702915030064

Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA // J. Paleolimnol. 2013. Vol. 49(2). P. 237–252.

Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area // J. Soils Sediments. 2004. Vol. 4(4). P. 247–260.

Håkanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects // Water Resour. Res. 1984. Vol. 20(1). P. 41–46.

Hosono T., Alvarez K., Kuwae M. Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources // Sci. Total Environ. 2016. Vol. 559. P. 24–37.

Jernström J., Lehto J., Dauvalter V. A., Hatakka A., Leskinen A., Paatero J. Heavy metals in bottom sediments of Lake Umbozero in Murmansk Region, Russia // Environ. Monit. Assess. 2010. Vol. 161, no. 1–4. P. 93–105.

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

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // Sci. Total Environ. 1992. Vol. 113(3). P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

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

Krachler M., Zheng J., Koerner R., Zdanowicz C., Fisher D., Shotyk W. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada // J. Environ. Monitor. 2005. Vol. 7(12). P. 1169–1176. doi: 10.1039/b509373b

Kuwae M., Tsugeki N. K., Agusa T., Toyoda K., Tani Y., Ueda S., Tanabe S., Urabe J. Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia // *Sci. Total Environ.* 2013. Vol. 442. P. 189–197. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.037

Liu E., Zhang E., Li K., Nath B., Li Y., Shen J. Historical reconstruction of atmospheric lead pollution in central Yunnan province, southwest China: an analysis based on lacustrine sedimentary records // *ESPR.* 2013. Vol. 20. P. 8739–8750. doi: 10.1007/s11356-013-1861-0

López D. L., Gierlowski-Kordesch E., Hollenkamp C. Geochemical Mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio // *Water Air Soil Pollut.* 2010. Vol. 213. P. 27–45.

McConnell J. R., Chellman N. J., Wilson A. I., Stohl A., Arienzo M. M., Eckhardt S., Steffensen J. P. Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict // *PNAS.* 2019. Vol. 116(30). P. 14910–14915. doi: 10.1073/pnas.1904515116

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // *PNAS.* 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Medvedev A., Slukovskii Z., Novitckiy D. Heavy metals pollution of small urban lakes sediments within the Onego Lake catchment area // *Polish J. Nat. Sci.* 2019. Vol. 34(2). P. 245–256.

Moiseenko T. I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish // *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53. P. 213–223.

Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. – Veränderungen seit 1971 // *Umschau in Wissenschaft und Technik.* 1979. N. 79. S. 778–783.

Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals // *Nature.* 1988. Vol. 333. P. 134–139.

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

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R. T. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway // *Environ. Geol.* 2000. Vol. 39(7). P. 723–732.

Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway // *Ambio.* 1993. Vol. 22, no. 4. P. 206–212.

Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E. Long-range transport of heavy metals as a factor of the formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia // *J. Elementol.* 2020. Vol. 25(1). P. 125–137. doi: 10.5601/jelem.2019.24.1.1816

Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // *Material Science and Applied Chemistry.* 2012. Vol. 26. P. 99–105.

Tessier A., Campbell P. G., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. No. 51(7). P. 844–851.

Thomas V. The elimination of lead in gasoline // *Annu. Rev. Energ. Environ.* 1995. Vol. 20. P. 301–324. doi: 10.1146/annurev.eg.20.110195.001505

Tylmann W., Łysek K., Kinder M., Pempkowiak J. Regional pattern of heavy metal content in lake sediments in northeastern Poland // *Water Air Soil Pollut.* 2011. Vol. 216(1–4). P. 217–228. doi: 10.1007/s11270-010-0529-3

Verta M., Tolonen K., Simola H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments // *Sci. Total Environ.* 1998. Vol. 87/88. P. 1–18.

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia // *Geography and Nat. Resources.* 2017. Vol. 38(1). P. 78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

Vierikko K., Yli-Pelkonen V. Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland // *Urban Ecosystems.* 2019. Vol. 22. P. 769–783. doi: 10.1007/s11252-019-00849-7

Virkutyte J., Vadakojyte S., Sinkevičius S., Sillanpää M. Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi* // *J. Chem. Ecol.* 2008. Vol. 24(2). P. 119–132. doi: 10.1080/02757540801920105

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59, no. 7. P. 1217–1232. doi: 10.1016/0016-7037(95)00038-2

Поступила в редакцию 13.02.2020

References

Belkina N. A., Subetto D. A., Efremenko N. A., Kullik N. V. Osobennosti raspredeleniya mikroelementov v poverkhnostnom sloe donnykh otlozhenii Onezhskogo ozera [Features of the distribution of trace elements in the surface layer of bottom sediments of Lake Onega]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2016. No. 3(83). P. 135–139.

Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of lakes bottom sediments]. Murmansk: MGTU, 2012. 242 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Biogeokhicheskie osobennosti raspredeleniya khal'kofil'nykh elementov (Hg, Cd, Pb, As) v vodoemakh severa evropeiskoi chasti Rossii [Biogeochemical features of the distribution

of chalcophilic elements (Hg, Cd, Pb, As) in water bodies in the north of the European part of Russia]. Murmansk: MGTU, 2015. 136 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka neobkhodimosti izvlecheniya donnykh otlozhenii oz. Nyud'yavr Monchegorskogo raiona Murmanskoi oblasti [Ecological and economic assessment of the need to extract bottom sediments of Lake Nyudyavr, Monchegorsk District of the Murmansk Region]. *Vestnik MGTU* [Bull. MSTU]. 2011. Vol. 14, no. 4. P. 884–891.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Tendentsii izmeneniya soderzhaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Severa Fennoskandii v po-

slednie stoletiya [Trends in heavy metal content in bottom sediments of lakes in the North of Fennoscandia in recent centuries]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 9. P. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Dauval'ter V. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B., Udachin V. N., Filippova K. A., Borisov A. P. Rekonstruktsiya zagryazneniya territorii poluoostrova Rybachii Murmanskoi oblasti tyazhelymi metallami [Reconstruction of pollution of the territory of the Rybachy Peninsula of the Murmansk Region with heavy metals]. *Trudy FNS* [Proceed. Fersman Sci. Session]. 2018. No. 15. P. 441–444. doi: 10.31241/FNS.2018.15.112

Demidov I. N., Shelekhova T. S. Diatomity Karelii (osobennosti formirovaniya, rasprostraneniya, perspektivy ispol'zovaniya) [Diatomites of Karelia (features of formation, distribution, prospects of use)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. 89 p.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Solodovnikov A. N., Morozov A. K. Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas [Soils of Karelia: A geochemical atlas]. Moscow: Nauka, 2008. 47 p.

GOST R 54000-2010 «Udobreniya organicheskie. Sapropeli. Obshchie tekhnicheskie usloviya» [GOST R 54000-2010 Organic fertilizers. Sapropels. General specifications].

Lavrova N. B. Razvitie rastitel'nosti basseina Onezhskogo ozera v khode degradatsii poslednego oledeniya [Development of vegetation of the Lake Onega basin during the degradation of the last glaciation]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. 2005. No. 8. P. 143–148.

Maslennikova A. V., Udachin V. N., Deryagin V. V. Paleoeкологиya i geokhimiya ozernoi sedimentatsii golotsena Urala [Paleoecology and geochemistry of lake sedimentation of the Holocene of the Urals]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2014. 136 p.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Il'yashuk B. P., Kagan L. Ya., Il'yashuk E. A. Paleoeologicheskaya rekonstruktsiya antropogennoi nagruzki [Paleoecological reconstruction of anthropogenic load]. *DAN* [Proceed. RAS]. 2000. No. 1. P. 115–118.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Rodyushkin I. V. Geokhimicheskaya migratsiya elementov v subarkticheskom vodoeme (na primere ozera Imandra) [Geochemical migration of elements in a subarctic pond (on the example of Lake Imandra)]. Apatity: KNTs RAN, 1997. 127 p.

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

Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P., Smirnova R. S., Basharkevich I. L., Onishchenko T. L., Pavlova L. N., Trefilova N. Ya., Achkasov A. I., Sarkisyan S. Sh. Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

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

Slukovskii Z. I. Normirovanie po litiyu kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Ladozhskoe i Chetyrekhverstnoe (Respublika Kare-

liya) [Normalization of lithium concentrations of heavy metals in the bottom sediments of Lakes Ladoga and Chetyrekhverstnoe (Republic of Karelia)]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Slukovskii Z. I. Mikroelementnyi sostav donnykh otlozhenii malykh ozer kak indikator vznikhoveniya ekologicheskikh riskov v usloviyakh urbanizirovannoi sredy (Respublika Kareliya) [Microelement composition of bottom sediments of small lakes as an indicator of environmental risks in the urban environment of the Republic of Karelia]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water Economy of Russia]. 2018. No. 6. P. 70–82.

Slukovskii Z. I., Dauval'ter V. A. Morfologiya i sostav tekhnogennykh chastits donnykh otlozhenii oz. Nyud'yavr, Murmanskaya oblast' [Morphology and composition of technogenic particles in bottom sediments of the Lake Nudyavr, Murmansk Region]. *Zapiski RMO* [Proceed. RMS]. 2019. No. 3. P. 102–117. doi: 10.30695/zrmo/2019.1483.102-117

Slukovskii Z. I., Il'mast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. Geokhimicheskaya spetsifika protsessa sovremennogo osadkonakopleniya v usloviyakh tekhnogeneza (na primere oz. Lamba, Petrozavodsk, Kareliya) [The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small Lake Lamba under technogenic impact]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 10. P. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Starodymova D. P., Shevchenko V. P., Kokryatskaya N. M., Aliev R. A., Bychkov A. Yu., Zabelina S. A., Chupakov A. V. Geokhimiya donnykh osadkov malogo ozera (vododbor Onezhskogo ozera, Arkhangel'skaya oblast') [Geochemistry of bottom sediments of a small lake (catchment of Lake Onega, Arkhangel'sk region)]. *Uspekhi sovr. estestvoznaniya* [Advances in Current Nat. Sci.]. 2016. No. 9. P. 172–177.

Strakhovenko V. D. Geokhimiya donnykh otlozhenii malykh kontinental'nykh ozer Sibiri [Geochemistry of bottom sediments of the small continental lakes of Siberia]: DSc (Dr. of Geol. and Miner.) thesis. Novosibirsk, 2011. 24 p.

Subetto D. A. Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstruction]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 343 p.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhoval M. V., Kolodei V. S. Pretsizionnyi geokhimicheskii (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of the composition of rocks and minerals: methodology and evaluation of the accuracy of the results by the example of early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Tomilina O. V., Palamchuk S. F., Yakhnin E. Ya., Egorov A. I. Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i pro-

vedenie operezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeolokarty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35,36 [Geochemical mapping of the north of the European territory of Russia within the framework of the international program *Ecogeochemistry of the Barents Region* and the leading stage of compiling the geochemical foundations of the third generation State Geological Map-1000 on sheets P-35.36]. Vol. 2: A research report. St. Petersburg, 2004. 146 p.

Trofimov V. T., Ziling D. G. Ekologicheskaya geologiya [Environmental geology]. Moscow: Geoinformark, 2002. 415 p.

Udachin V. N., Deryagin V. V., Kitagava R., Aminov P. G. Izotopnaya geokhimiya donnykh otlozhenii ozer Yuzhnogo Urala dlya otsenki masshtabov gornopromyshlennogo tekhnogeneza [Isotopic geochemistry of bottom sediments in lakes of the Southern Urals for assessing the extent of mining technogenesis]. *Vestnik TGU* [Tomsk St. Univ. Bull.]. 2009. No. 3. P. 144–149.

Vinogradova A. A., Kotova E. I. Vklady istochnikov Evropy v zagryaznenie svintsom i kadmiem severnykh raionov Evropeiskoi Rossii [Contributions of European sources to lead and cadmium pollution in the northern regions of European Russia]. *Zhivye i biokosnye sistemy* [Living and Biocos Systems]. 2018. No. 23. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-23/article-2> (accessed: 03.12.2019).

Vinogradova A. A., Ivanova Yu. A. Zagryaznenie vozdukhnoi sredy v tsentral'noi Karelii pri dal'nem perenose antropogennykh primesei v atmosfere [Air pollution in central Karelia during long-range transport of anthropogenic impurities in the atmosphere]. *Izvestiya RAN. Ser. geogr.* [Bull. RAS. Geographical ser.]. 2013. No. 5. P. 98–108.

Vodyanitskii Yu. N. Ob opasnykh tyazhelykh metal-lakh/metalloidakh v pochvakh [On hazardous heavy metals/metalloids in soils]. *Byull. Pochv. in-ta* [Bull. Dokuchaev Soil Inst.]. 2011. No. 68. P. 56–82.

Yanin E. P. Formy nakhozhdeniya kadmiya v tekhnogennykh ilakh reki Pakhry i otsenka ego migratsionnykh sposobnostei [Forms of the presence of cadmium in technogenic silts of the Pakhra River and assessment of its migration abilities]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2011. No. 1. P. 42–46.

Barnicki J. An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results. *Water Air Soil Pollut.* 1994. Vol. 75(3-4). P. 227–263. doi: 10.1007/BF00482939

Birch L., Hanselmann K. W., Bachofen R. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments: Historical records of anthropogenic emissions in a meromictic alpine lake. *Water Res.* 1996. Vol. 30, iss. 3. P. 679–687. doi: 10.1016/0043-1354(95)00231-6

Cooke C. A., Abbott M. B. A paleolimnological perspective on industrial-era metal pollution in the central Andes, Peru. *Sci. Total Environ.* 2008. Vol. 393. P. 262–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.034

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of the Arctic freshwater system based on concentrations of heavy metals in the bottom sediments. *Geochem. Int.* 2018. Vol. 56, no. 8. P. 842–856. doi: 10.1134/S0016702918080037

Dauvalter V., Kashulin N. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in lake Umbozero, Murmansk Province. *Water Res.* 2010. No. 37. P. 497–512.

Dauvalter V., Kashulin V., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *J. Environ. Sci. Health A Tox Hazar.* 2011. Vol. 46. P. 1020–1033.

Ermakov V. V. Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons. *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53, no. 3. P. 195–212. doi: 10.1134/S0016702915030064

Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *J. Paleolimnol.* 2013. Vol. 49(2). P. 237–252.

Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *J. Soils Sediments.* 2004. Vol. 4(4). P. 247–260.

Håkanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects. *Water Resour. Res.* 1984. Vol. 20(1). P. 41–46.

Hosono T., Alvarez K., Kuwae M. Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources. *Sci. Total Environ.* 2016. Vol. 559. P. 24–37.

Jernström J., Lehto J., Dauvalter V. A., Hatakka A., Leskinen A., Paatero J. Heavy metals in bottom sediments of Lake Umbozero in Murmansk Region, Russia. *Environ. Monit. Assess.* 2010. Vol. 161, no. 1–4. P. 93–105.

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

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *Sci. Total Environ.* 1992. Vol. 113(3). P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

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

Krachler M., Zheng J., Koerner R., Zdanowicz C., Fisher D., Shotyck W. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada. *J. Environ. Monitor.* 2005. Vol. 7(12). P. 1169–1176. doi: 10.1039/b509373b

Kuwae M., Tsugeki N. K., Agusa T., Toyoda K., Tani Y., Ueda S., Tanabe S., Urabe J. Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia. *Sci. Total Environ.* 2013. Vol. 442. P. 189–197. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.037

Liu E., Zhang E., Li K., Nath B., Li Y., Shen J. Historical reconstruction of atmospheric lead pollution in central Yunnan province, southwest China: an analysis based on lacustrine sedimentary records. *ESPR.* 2013. Vol. 20. P. 8739–8750. doi: 10.1007/s11356-013-1861-0

López D. L., Gierlowski-Kordesch E., Hollenkamp C. Geochemical mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio. *Water Air Soil Pollut.* 2010. Vol. 213. P. 27–45.

McConnell J. R., Chellman N. J., Wilson A. I., Stohl A., Arienzo M. M., Eckhardt S., Steffensen J. P. Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict. *PNAS.* 2019. Vol. 116(30). P. 14910–14915. doi: 10.1073/pnas.1904515116

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

Medvedev A., Slukovskii Z., Novitsky D. Heavy metals pollution of small urban lakes sediments within the Onego Lake catchment area. *Polish J. Nat. Sci.* 2019. Vol. 34(2). P. 245–256.

Moiseenko T. I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53. P. 213–223.

Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. – Veränderungen seit 1971. *Umschau in Wissenschaft und Technik.* 1979. No. 79. P. 778–783.

Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals. *Nature.* 1988. Vol. 333. P. 134–139.

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

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R. T. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway. *Environ. Geol.* 2000. Vol. 39(7). P. 723–732.

Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway. *Ambio.* 1993. Vol. 22, no. 4. P. 206–212.

Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E. Long-range transport of heavy metals as a factor of the

formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia. *J. Elementol.* 2020. Vol. 25(1). P. 125–137. doi: 10.5601/jelem.2019.24.1.1816

Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel. *Material Science and Applied Chemistry.* 2012. Vol. 26. P. 99–105.

Tessier A., Campbell P. G., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 1979. No. 51(7). P. 844–851.

Thomas V. The elimination of lead in gasoline. *Annu. Rev. Energ. Environ.* 1995. Vol. 20. P. 301–324. doi: 10.1146/annurev.eg.20.110195.001505

Tylmann W., Łysek K., Kinder M., Pempkowiak J. Regional pattern of heavy metal content in lake sediments in northeastern Poland. *Water Air Soil Pollut.* 2011. Vol. 216(1–4). P. 217–228. doi: 10.1007/s11270-010-0529-3

Verta M., Tolonen K., Simola H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments. *Sci. Total Environ.* 1998. Vol. 87/88. P. 1–18.

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. *Geography and Nat. Resources.* 2017. Vol. 38(1). P. 78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

Vierikko K., Yli-Pelkonen V. Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland. *Urban Ecosystems.* 2019. Vol. 22. P. 769–783. doi: 10.1007/s11252-019-00849-7

Virkutyte J., Vadakojyte S., Sinkevičius S., Sillanpää M. Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi.* *J. Chem. Ecol.* 2008. Vol. 24(2). P. 119–132. doi: 10.1080/02757540801920105

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59, no. 7. P. 1217–1232. doi: 10.1016/0016-7037(95)00038-2

Received February 13, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слуковский Захар Иванович

старший научный сотрудник лаб. водных экосистем, к. б. н. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209

старший научный сотрудник лаб. геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии Институт геологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр» РАН ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: slukovsky87@gmail.com
тел.: 89602140712

CONTRIBUTORS:

Slukovskii, Zakhar

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences 14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: slukovsky87@gmail.com
tel.: +79602140712

Даувальтер Владимир Андреевич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем, д. г. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: vladimir@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79774

Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Center, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru
tel.: (81555) 79774

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.5+ (581.19:582.5)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО МЕТАБОЛОМА ГОРЦА ЗЕМНОВОДНОГО (*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) DELARBRE) ИЗ РАЗНОТИПНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

Ю. В. Крылова¹, Е. А. Курашов^{1,2}, А. Г. Русанов²

¹ Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), Россия

² Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Впервые проведено хромато-масс-спектрометрическое исследование низкомолекулярного метаболома (НМ) горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, семейство Polygonaceae Juss.) в фазе цветения, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского озера, с целью выявления его качественного и количественного состава. Эфирное масло, содержащее низкомолекулярные органические соединения (НОС), получали из высушенных растений методом паровой гидродистилляции с использованием аппарата Клевенджера. Состав и содержание НОС в эфирном масле выявляли при помощи хромато-масс-спектрометрического комплекса TRACE DSQ II (Thermo Electron Corporation) в программном режиме температур с использованием декафторбензофенона и бензофенона в качестве внутренних стандартов. Всего обнаружено 124 НОС, из которых идентифицировано 110. Среди НОС горца земноводного преобладали карбоновые кислоты (50–60 % по содержанию), альдегиды (9–14 %) и углеводороды (6–9 %). НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прошлом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107 и 114) и их общим содержанием в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях. Наличие целого ряда биологически активных метаболитов в составе НМ *P. amphibia* свидетельствует о выраженном влиянии данного растения на гидробиоценозы литорали Ладоги.

Ключевые слова: *Persicaria amphibia*; низкомолекулярные органические соединения; низкомолекулярный метаболом; газовая хромато-масс-спектрометрия; Ладожское озеро.

J. V. Krylova, E. A. Kurashov, A. G. Rusanov. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPONENT COMPOSITION OF THE LOW MOLECULAR WEIGHT METABOLOME OF WATER SMARTWEED (*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) DELARBRE) FROM DIVERSE HABITATS IN LAKE LADOGA

A chromatographic-mass spectrometric study of the low molecular weight metabolome (LMWM) of water smartweed (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, family Polygonaceae Juss.), growing in various biotopes of Lake Ladoga, was carried out for the first time during the flowering phase in order to reveal its qualitative and quantitative composition. Essential oil containing low molecular weight organic compounds (LMWOC) from dried plants was obtained by Clevenger hydrodistillation with steam. The composition and content of LMWOC in the essential oil were detected using a TRACE DSQ II chromatomass spectrometric complex (Thermo Electron Corporation) in a programmed temperature mode using decafluorobenzophenone and benzophenone as internal standards. A total of 124 LMWOC were detected, of which 110 were identified. Carboxylic acids (50–60 % by content), aldehydes (9–14 %) and hydrocarbons (6–9 %) prevailed among the LMWOC in the water smartweed. The LMWM of *P. amphibia* from the biotope exposed until recently to heavy human impact (effluents from the pulp and paper industry and woodworking enterprises) featured the smallest number of LMWOC (87 versus 107 and 114 in other biotopes), and their total content was 3–3.5 times lower than in plants growing under more favourable conditions. The presence of a number of biologically active metabolites in the LMWM of water smartweed suggests this plant has a pronounced effect on littoral aquatic organisms communities in Lake Ladoga.

Key words: *Persicaria amphibia*; low molecular weight organic compounds; low molecular weight metabolome; gas chromatography-mass spectrometry; Lake Ladoga.

Введение

На современном этапе развития гидроэкологии существует понимание, что низкомолекулярные органические соединения (НОС) (первичные и вторичные метаболиты) водных растений играют весьма значимую роль в формировании и функционировании сообществ гидробионтов в водных экосистемах [Гуревич, 1978; Fink, 2007; Kurashov et al., 2014].

Горец земноводный *Persicaria amphibia* (L.) Delarbre (синоним *Polygonum amphibium*), или водяная гречиха (рис. 1), относится к семейству гречишных (Polygonaceae Juss.). Горец является многолетним растением и встречается в двух формах: водной и наземной. Стебель у водной формы ветвистый, достигает в длину 150 см. Длинночерешковые листья плавают по поверхности воды. Листовые пластинки продолговатые, голые, блестящие, по краю часто с короткими волосками, тупые или коротко заостренные, длиной от 5 до 17 см и шириной 1–5 см. Цветки расположены в густых широких колосовидных кистях, длина которых 2–6 см, а ширина 0,7–1,5 см, на голых цветоносах, возвышающихся над водой [Кашина, Тупицына, 1992].

Горец земноводный широко распространен на территории всего Северного полушария, интродуцирован в Мексике, Южной Америке и Южной Африке [Hinds, Freeman, 2005], является одним из руководящих видов, создающим

пять растительных ассоциаций в Ладожском озере [Распопов, 1985].

Однако из многочисленных (129) видов рода *Persicaria* [*Persicaria*...] *P. amphibia* в отношении химического состава является, по-видимому, одним из наименее изученных, так как информация о полном составе его низкомолекулярного метаболома (НМ) в литературе отсутствует. Например, в эфирном масле *Persicaria minor* (Huds.) Opiz выявлено от 44 до 69 соединений [Christopher et al., 2015; Rahnamaie-Tajadod et al., 2019], при этом данный вид характеризуется высоким уровнем синтеза вторичных метаболитов, особенно флавоноидов и терпеноидов [Christopher et al., 2015]. Относительно *P. amphibia* и других исследованных представителей этого рода известно, что у них отсутствуют экдистероиды [Volodin et al., 2002]. Сведения о фитохимическом составе некоторых других видов рода содержатся в публикациях [Prota, 2014; Abbasi et al., 2015; Hao et al., 2015].

Наряду с прочими водными растениями горец земноводный оказывает специфическое воздействие на других гидробионтов, формируя среду обитания, в том числе посредством синтеза первичных и вторичных низкомолекулярных метаболитов. С другой стороны, конкретный состав НМ *P. amphibia* будет зависеть от его реакции на биотические и абиотические факторы водной среды, включая антропогенный. Закономерности изменения НМ горца



Рис. 1. Горец земноводный (Ладожское озеро)

Fig. 1. Water smartweed (Lake Ladoga)

земноводного в тех или иных условиях также не изучены, хотя известно, что НМ водных растений является весьма подвижной системой, чутко реагирующей на изменения окружающей среды, в том числе на биотические и абиотические стрессы [Крылова и др., 2016; Kurashov et al., 2018; Baharum et al., 2018].

Помимо экологической роли НОС, синтезируемые *P. amphibia*, могут иметь важное прикладное значение. Так же, как и другие виды рода *Persicaria*, которые широко используются в фармакологии и медицине (в том числе традиционной) [Zhou et al., 2011; Zheng et al., 2014; Nan et al., 2018], горец земноводный является ценным природным ресурсом, так как обладает тонизирующими, мочегонными, кровоостанавливающими свойствами, применяется при желудочно-кишечных заболеваниях, при профилактике и лечении повышенного артериального давления, подагры, ревматизма, мочекаменной болезни, холецистита, нервных заболеваний [Горец...; Zhou et al., 2011].

По приблизительным оценкам, не менее 50 000–80 000 видов цветковых растений в мире используются для медицинских целей [Duke, 2009]. Водные растения в сравнении с наземными в этом отношении существенно недооценены и недоиспользуются (как минимум на порядок), хотя являются богатым источником ценных биоактивных соединений и перспективны для разнопланового использования, в том числе для биомониторинга, фитореме-

диации и как лекарственные растения [Swapna et al., 2011; Aasim et al., 2019].

В этой связи целью работы было изучить компонентный и количественный состав НМ горца земноводного из Ладожского озера и оценить степень сходства НМ растений из разнотипных биотопов.

Материалы и методы

Исследованные места обитания

Полевые исследования проводились в разных районах северной части Ладожского озера: в проливе напротив г. Питкяранта, около пос. Ляскеля и в Якимварском заливе около пос. Сорола (Республика Карелия) с 22 по 25 июля 2014 г. (рис. 2). Средние значения (медиана) некоторых основных показателей состояния водной среды местообитаний *P. amphibia* представлены в табл. 1. Для исследования отбирались растения, относящиеся к водной форме горца земноводного.

Станция «Питкяранта». Местообитание в районе г. Питкяранта представляло собой затишную заиленную литораль в техногенно загрязненном ландшафте. Грунт – заиленный песок с растительными остатками. Топкий илистый берег зарастал хвощом приречным (*Equisetum fluviatile* L.), тростником южным (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и осокой острой (*Carex acuta* L.). На мелководье встре-

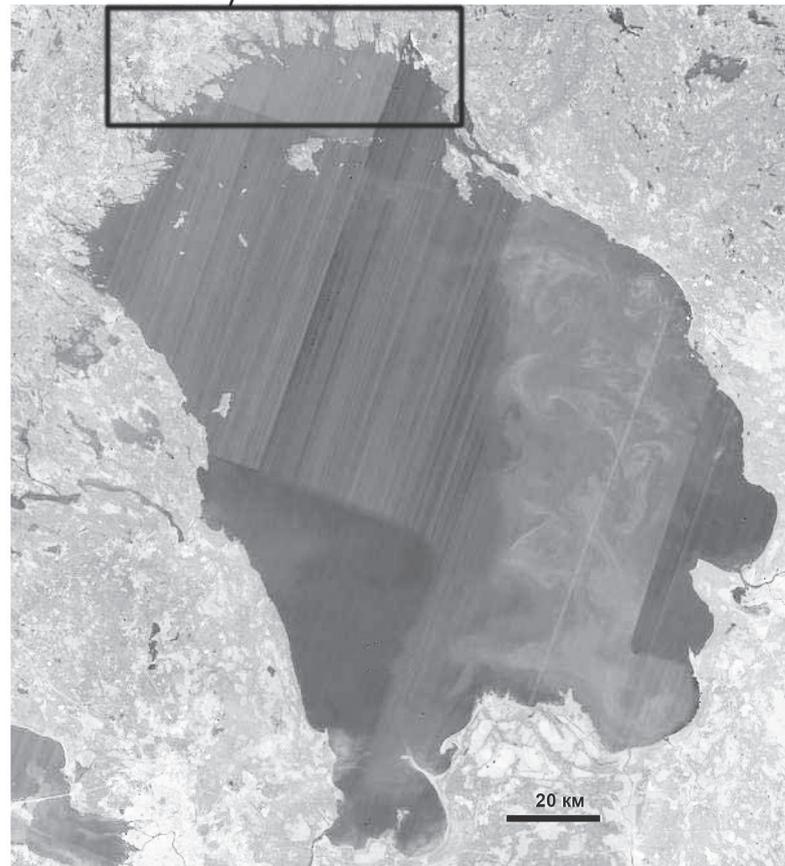
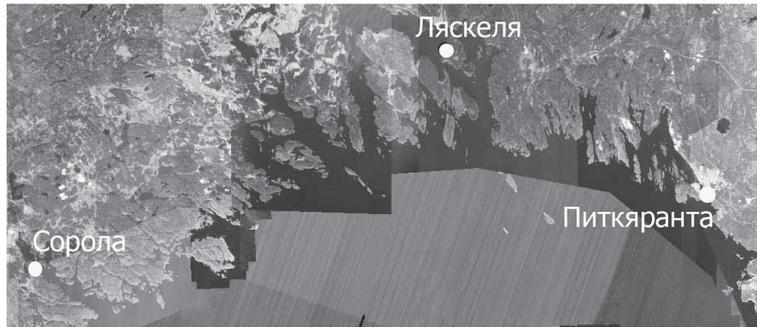


Рис. 2. Местоположение отбора образцов *P. amphibia* в Ладожском озере: у г. Питкяранта, пос. Сорола, пос. Ляскеля (использованы картографические материалы с сайта: <https://yandex.ru/maps>)

Fig. 2. Location of sampling of *P. amphibia* in Lake Ladoga: near Pitkyaranta, Sorola, Lyaskelya (cartographic materials used from the site: <https://yandex.ru/maps>)

чались единичные куртины рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.), частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.) и сусака зонтичного (*Butomus umbellatus* L.), а также пятна зарослей ежеголовника всплывающего (*Sparganium emersum* Rehm.). Погруженные растения были представлены мозаичным комплексом – рдестами злаковым (*Potamogeton gramineus* L.) и пронзеннолистным (*Potamogeton perfoliatus* L.), элодеей

канадской (*Elodea canadensis* Michx.), урутью колосистой (*Myriophyllum spicatum* L.) и болотником обоеполым (*Callitriche hermaphrodita* L.). На дне между погруженными растениями часто встречались дерновины ситняга игольчатого (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem. et Schult.) и ситняга маленького (*Eleocharis parvula* (Roem. & Schult.) Link ex Bluff, Nees & Schauer). Горец земноводный произрастал в пределах этого

Таблица 1. Средние значения (медиана) некоторых основных показателей состояния водной среды местообитаний *P. amphibia* в Ладожском озере в период исследований (июль 2014 г.) и координаты точек отбора
 Table 1. Average values (median) of some basic indicators of the aquatic environment state in habitats of *P. amphibia* in Lake Ladoga during the study period (July 2014) and the coordinates of the sampling points

Показатели Indicators	Питкяранта Pitkyaranta	Сорола Sorola	Ляскеля Lyaskelya
Температура, °C Temperature, °C	27,0	23,1	24,3
Электропроводность, мСм/см Conductivity, mS/cm	0,138	0,094	0,072
Общая минерализация, г/л Total Dissolved Solids, g/l	0,086	0,063	0,047
Концентрация кислорода, мг/л (% насыщения) Oxygen concentration, mg/l (% saturation)	11,59 (144,7)	9,16 (107,2)	9,14 (109,4)
pH	8,63	7,70	7,56
Концентрация аммонийного азота (NH ₄ ⁺ , мг/л) Ammonium nitrogen concentration (NH ₄ ⁺ , mg/l)	0,10	0,20	0,19
Концентрация нитратного азота (NO ₃ ⁻ , мг/л) Nitrate concentration (NO ₃ ⁻ , mg/l)	2,86	4,41	3,00
Концентрация хлоридов (Cl ⁻ , мг/л) Chloride concentration (Cl ⁻ , mg/l)	0,81	0,67	0,42
Концентрация фикоцианинсодержащих водорослей, кл/мл Concentration of phycocyanin-containing algae, cells/ml	1230	2260	1030
Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мкг/л Chlorophyll- <i>a</i> concentration, µg/l	6,6	4,0	3,2
Мутность, NTU Turbidity, NTU	3,4	3,8	1,0
Координаты точек отбора <i>P. amphibia</i> Coordinates of the sampling points of <i>P. amphibia</i>	N61°33.954', E31°28.040'	N61°29.159', E30°13.816'	N61°42.415', E31°00.037'

литорального биотопа небольшими пятнами. Несмотря на то что данный биотоп находится в непосредственной близости от Питкярантского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), отрицательное воздействие завода на биотоп, по-видимому, минимально, т. к. стоки завода в эту зону не поступают. В то же время, по-видимому, биотоп подвержен серьезной биогенной нагрузке со стороны окружающих его домов, о чем свидетельствуют значительное развитие водной растительности (очень заросшая литораль – 80–85 %), высокие значения pH (8,63) и концентрации кислорода (144,7 % насыщения) вследствие интенсивно протекающих продукционных процессов (табл. 1).

Станция «Сорола». В районе пос. Сорола дно в месте отбора было глинистое с дерновиной из корней тростника. *P. amphibia* произрастал рядом с зарослями тростника южного. В разрывах тростниковых зарослей расположены изреженные заросли хвоща приречного и ситняка болотного (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult.). К ним примешивались куртины тростянки овсяничной (*Scolochloa festucacea* (Willd.) Link) и манника наплывающего (*Glyceria fluitans* (L.) R. Br.), а также встречались пятна за-

рослей ежеголовника всплывающего и стрелолиста обыкновенного (*Sagittaria sagittifolia* L.). Пояс погруженной растительности был представлен мозаичными зарослями рдеста злакового и пронзеннолистного; в прибрежной зоне встречался полушник озерный (*Isoetes lacustris* L.). Литораль в данном местообитании *P. amphibia* может быть охарактеризована как сильно заросшая (степень зарастания 60–65 %).

Станция «Ляскеля». Местообитание в районе пос. Ляскеля располагалось рядом с устьем реки Янисйоки, по которой в залив в недавнем прошлом попадали загрязняющие стоки Ляскельского бумажного завода и деревообрабатывающих производств. Это привело к сильной деградации водной растительности из-за токсического загрязнения.

В 2006 г. в этом месте из макрофитов обнаружен только сильно угнетенный тростник (*P. australis*). Степень зарастания литорали не превышала 6–8 %. В 2014 г. уже наблюдалось заметное улучшение экологической обстановки в заливе в связи с закрытием и реконструкцией ряда производств, отмечалось значительное развитие разнообразной водной растительности в восстанавливаемом ме-

стообитании (степень зарастания 60–65 %, сильно заросшая литораль), в том числе и горца земноводного. Мелкопесчаная литораль с каменистым берегом и пологим уклоном дна в этом месте имела мозаичный характер расположения зарослей гелофитов, погруженных и плавающих растений. Отдельно стоящие куртины тростника и ситняка болотного образовывали прерывистую полосу гелофитов. Между ними отдельными пятнами располагались плавающие растения – ежеголовник узколистный (*Sparganium angustifolium* Michx.), стрелолист плавающий (*S. natans* Pall.) и горец земноводный. Подводный ярус был образован рдестом пронзеннолистным, урутью очередноцветковой (*Myriophyllum alterniflorum* DC.) и шелковником дихотомическим (*Batrachium dichotomum* (Schmalh.) Trautv.), отдельные растения которых были разбросаны по всему мелководью. С глубиной их сменяли монодоминантные заросли рдеста пронзеннолистного.

Исследованные местообитания отличались по общей минерализации, которая была наибольшей на участке акватории озера у г. Питкяранта (табл. 1). Здесь же выявлены более высокие показатели хлорофилла и в 2 раза более низкая концентрация аммонийного азота, чем в других местообитаниях, что объясняется его потреблением интенсивно продуцирующей биотой (растения и бактерии). Эти данные свидетельствуют, что местообитание у г. Питкяранта имело наиболее высокий трофический статус.

Методы исследования

Собранные образцы растений сушили без доступа прямых солнечных лучей до воздушно-сухого состояния. Эфирное масло, содержащее НОС, из высушенных растений получали методом гидродистилляции с использованием аппарата Клевенджера не ранее чем через 3 месяца после сбора [ГОСТ 24027.2-80]. Перед перегонкой высушенный растительный материал измельчали в блендере Waring BB-25ES (Waring, США). При гидродистилляции использовали навески сухого сырья 16–20 г. Полученный дистиллят экстрагировали гексаном. Экстракты до хромато-масс-спектрометрического анализа сохраняли в морозильной камере при температуре –18 °С.

Состав НОС *P. amphibia* выявляли в гексановых экстрактах на хромато-масс-спектрометрическом комплексе TRACE DSQ II (Thermo Electron Corporation) с квадрупольным масс-анализатором. Использовали колонку Thermo TR-5ms SQC 15 м × 0,25 мм с фазой ID 0,25 мкм. Газоносителем был гелий. Масс-спектры регистри-

ровали в режиме сканирования по полному диапазону масс (30–580 m/z) в программированном режиме температур (35° – 3 мин, 2°/мин до 60° – 3 мин, 2°/мин до 80° – 3 мин, 4°/мин до 120° – 3 мин, 5°/мин до 150° – 3 мин, 15°/мин до 240° – 10 мин) с последующей пошаговой обработкой хроматограмм. Идентификацию выявленных НОС проводили с использованием библиотек масс-спектров «NIST-2014» и «Wiley». Для более точной идентификации применяли линейные индексы удерживания, рассчитанные по методу: [Ткачев, 2008] с использованием стандартов алканов C₇–C₃₀. Количественный анализ выполняли с использованием декафторбензофенона и бензофенона в качестве внутренних стандартов.

Сходство образцов эфирного масла по качественному составу НОС оценивали с помощью коэффициентов сходства Жаккара (*J*) [Jaccard, 1901] и Сьёренсена – Чекановского (*Qs*) [Czekanowski, 1922; Sorensen, 1948], рассчитанных по следующим формулам:

$$J = \frac{c}{a+b-c}, Qs = \frac{2c}{a+b},$$

где *c* – число общих НОС для образцов А и В; *a* – НОС, присутствующие в А; *b* – НОС, присутствующие в В.

Для оценки сходства образцов по количественным данным (по содержанию отдельных соединений и групп соединений) использовали индекс Мориситы – Хорна [Morisita, 1959]:

$$Cmh = \frac{2 \sum_i (a_i \cdot b_i)}{(da + db) \cdot aN \cdot bN},$$

где *a_i* – содержание *i*-го соединения (группы соединений) в образце А; *b_i* – то же для образца В; *aN* – суммарное содержание НОС в образце А; *bN* – то же для образца В; *da* = Σ(*a_i*²) / *aN*², *db* = Σ(*b_i*²) / *bN*².

Результаты и обсуждение

Исследование компонентного состава НМ горца земноводного из Ладожского озера показало наличие значительного числа НОС (124), принадлежащих к разным классам химических соединений (табл. 2 и 3), из которых 14 соединений остались неидентифицированными.

Изученные образцы горца из разных мест обитания отличались как по числу выявленных НОС, так и по их содержанию. В образцах из местообитаний у г. Питкяранта и п. Сороча НМ горца земноводного содержал близкое число соединений – 107 и 110. Суммарная концентрация НОС в биомассе растений

Таблица 2. Компонентный состав эфирного масла *P. amphibia* из разнотипных местообитаний в Ладожском озере

Table 2. Component composition of essential oil of *P. amphibia* from different types of habitats in Lake Ladoga

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
1	3-гексанон 3-hexanone	C ₆ H ₁₂ O	790	0,32	0,71	-
2	2-гексанон 2-hexanone	C₆H₁₂O	793	1,13	1,62	-
3	гексаналь hexanal	C₆H₁₂O	799	3,93	3,91	4,28
4	гексан-2-ол hexan-2-ol	C ₆ H ₁₄ O	801	0,40	0,44	-
5	(E)-гекс-2-еналь (E)-hex-2-enal	C₆H₁₀O	843	1,74	1,56	3,02
6	1,2-диметилбензен 1,2-dimethylbenzene	C ₈ H ₁₀	857	0,15	0,15	0,30
7	гексан-1-ол hexan-1-ol	C ₆ H ₁₄ O	868	0,10	0,18	0,14
8	1,3-диметилбензен 1,3-dimethylbenzene	C ₈ H ₁₀	883	0,10	0,14	0,10
9	гептан-2-он heptan-2-one	C ₇ H ₁₄ O	891	0,10	0,11	0,13
10	нонан nonane	C ₉ H ₂₀	898	0,14	0,16	0,19
11	гептаналь heptanal	C ₇ H ₁₄ O	900	0,43	0,74	0,77
12	оксолан-2-илметанол oxolan-2-ylmethanol	C ₅ H ₁₀ O ₂	913	0,12	0,19	-
13	бензальдегид benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	950	0,39	0,98	0,61
14	2-гидропероксигексан 2-hydroperoxyhexane	C ₆ H ₁₄ O ₂	961	-	0,17	-
15	1-циклогексилэтанон 1-cyclohexylethanone	C ₈ H ₁₄ O	967	0,30	0,71	-
16	окт-1-ен-3-ол oct-1-en-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	979	0,09	0,17	0,22
17	2-метилоктан-3-он 2-methyloctan-3-one	C ₉ H ₁₈ O	984	0,20	0,18	0,60
18	2-пентилфуран 2-pentylfuran	C₉H₁₄O	987	0,28	0,42	1,03
19	2-метилгепт-6-ен-1-ол 2-methylhept-6-en-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	996	0,06	0,25	-
20	4-этилциклогексан-1-ол 4-ethylcyclohexan-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	998	0,26	-	0,65
21	2-[(E)-пент-2-енил]фуран 2-[(E)-pent-2-enyl]furan	C ₈ H ₁₆ O	998	-	0,35	0,77
22	октаналь octanal	C ₈ H ₁₆ O	1003	0,10	0,36	0,64
23	(2E,4E)-гепта-2,4-диеналь (2E,4E)-hepta-2,4-dienal	C ₇ H ₁₀ O	1009	0,37	0,47	0,66
24	1-метил-3-пропан-2-илбензен; [m-цимен] 1-methyl-3-propan-2-ylbenzene; [m-cymene]	C ₁₀ H ₁₄	1014	0,06	0,11	0,15
25	1-метил-4-пропан-2-илбензен; [p-цимен] 1-methyl-4-propan-2-ylbenzene; [p-cymene]	C ₁₀ H ₁₄	1017	-	-	0,32
26	(4S)-1-метил-4-проп-1-ен-2-илциклогексен; [β-лимонен] (4S)-1-methyl-4-prop-1-en-2-ylcyclohexene [β-limonene]	C ₁₀ H ₁₆	1020	0,16	0,24	0,38
27	2,2,6-триметилциклогексан-1-он 2,2,6-trimethylcyclohexan-1-one	C ₉ H ₁₆ O	1025	0,14	0,15	0,25

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
28	октан-1-амин octan-1-amine	C ₈ H ₁₉ N	1032	0,05	0,04	-
29	2-фенилацетальдегид 2-phenylacetaldehyde	C ₈ H ₈ O	1037	0,06	0,18	0,07
30	(3E,5E)-окта-3,5-диен-2-он (3E,5E)-octa-3,5-dien-2-one	C₈H₁₄O	1039	0,32	1,01	0,58
31	4-метилиден-1-пропан-2-илбицикло[3.1.0]гексан; [сабинен] 4-methylidene-1-propan-2-ylbicyclo[3.1.0]hexane; [sabenene]	C ₁₀ H ₁₆	1051	-	-	0,24
32	3,6,6-триметилциклогекс-2-ен-1-он 3,6,6-trimethylcyclohex-2-en-1-one	C ₉ H ₁₄ O	1052	0,05	0,11	-
33	(E)-окт-2-еналь (E)-oct-2-enal	C ₈ H ₁₄ O	1056	0,26	0,33	0,21
34	Неидентифицированное m/z 134 [M+], 44 (100)		1069	0,08	0,06	-
35	Неидентифицированное m/z 134 [M+], 57 (100)	C ₈ H ₁₂ O ₃	1076	0,06	0,08	-
36	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)	C ₅ H ₁₂ N ₂	1079	0,13	-	-
37	3,7-диметилукта-1,6-диен-3-ол; [β-линалоол] 3,7-dimethylocta-1,6-dien-3-ol; [β-linalool]	C ₁₀ H ₁₈ O	1100	0,23	0,37	0,37
38	нонаналь nonanal	C ₉ H ₁₈ O	1104	0,43	0,97	0,97
39	1,7,7-триметилбицикло[2.2.1]гептан-2-он; [камфора] 1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-one; [camphor]	C ₁₀ H ₁₆ O	1128	0,11	-	-
40	2,6,6-триметилциклогекс-2-ен-1,4-дион; [4-кетоизофорон] 2,6,6-trimethylcyclohex-2-ene-1,4-dione; [4-ketoisophorone]	C ₉ H ₁₂ O ₂	1137	-	0,19	-
41	2-ноненаль 2-nonenal	C ₉ H ₁₆ O	1158	0,12	0,13	0,58
42	нафтален naphthalene	C ₁₀ H ₈	1163	0,16	0,42	-
43	2,6,6-триметилциклогекса-1,3-диен-1-карбальдегид; [сафраналь] 2,6,6-trimethylcyclohexa-1,3-diene-1-carbaldehyde; [safranal]	C ₁₀ H ₁₄ O	1189	0,43	0,51	0,50
44	додекан dodecane	C ₁₂ H ₂₆	1200	0,36	0,35	0,34
45	Неидентифицированное m/z 194 [M+], 112 (100)		1202	1,16	0,26	0,33
46	1,3-бензотиазол 1,3-benzothiazole	C₇H₅NS	1209	0,97	2,09	1,23
47	Неидентифицированное m/z 194 [M+], 112 (100) (изомер)		1221	0,10	-	-
48	3,7-диметилукт-6-ен-1-ол; [β-цитронеллол] 3,7-dimethyloct-6-en-1-ol; [β-citronellol]	C ₁₀ H ₂₀ O	1238	0,16	0,41	-
49	2-(2,6,6-триметициклогексен-1-ил)ацетальдегид 2-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)acetaldehyde	C ₁₁ H ₁₈ O	1245	0,06	0,06	-
50	цис-3,7-диметилукта-2,6-диен-1-ол; [β-нерол] (2Z)-3,7-dimethylocta-2,6-dien-1-ol; [β-nerol]	C ₁₀ H ₁₈ O	1262	0,64	0,78	0,44
51	2-метилнафтален 2-methylnaphthalene	C ₁₁ H ₁₀	1269	0,16	0,12	0,16
52	2-метил-5-пропан-2-илфенол; [карвакрол] 2-methyl-5-propan-2-ylphenol; [carvacrol]	C ₁₀ H ₁₄ O	1300	-	-	0,41
53	5-метил-2-пропан-2-илфенол; [тимол] 5-methyl-2-propan-2-ylphenol; [thymol]	C ₁₀ H ₁₄ O	1311	-	-	0,89
54	(2E,4E)-дека-2,4-диеналь (2E,4E)-deca-2,4-dienal	C ₁₀ H ₁₈ O	1318	0,12	0,25	0,57

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
55	1,1,6-триметил-2Н-нафтаден 1,1,6-trimethyl-2H-naphthalene	C ₁₃ H ₁₆	1341	-	0,15	0,33
56	1-трет-бутил-3-метил-5-пропан-2-илбензен 1-tert-butyl-3-methyl-5-propan-2-ylbenzene	C ₁₄ H ₂₂	1362	-	0,06	-
57	Неидентифицированное m/z 148 [M+], 107 (100)		1367	0,47	-	0,76
58	(E)-ундец-2-еналь (E)-undec-2-enal	C ₁₁ H ₂₀ O	1368	-	0,17	-
59	тетрадекан tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	1400	0,50	0,65	0,58
60	(E)-4-(2,4,4-триметилциклогекса-1,5-диен-1-ил)бут-3-ен-2-он (E)-4-(2,4,4-trimethylcyclohexa-1,5-dien-1-yl)but-3-en-2-one	C ₁₃ H ₁₈ O	1424	0,13	0,53	0,76
61	1-метил-4-(6-метилгептан-2-ил)бензен 1-methyl-4-(6-methylheptan-2-yl)benzene	C ₁₅ H ₂₄	1440	0,21	0,09	-
62	2-(2,6-диметилгепт-6-ен-2-ил)-5-метилфуран 2-(2,6-dimethylhept-6-en-2-yl)-5-methylfuran	C ₁₄ H ₂₂ O	1448	0,04	0,16	0,09
63	(5E)-6,10-диметилундека-5,9-диен-2-он; [геранилацетон] (5E)-6,10-dimethylundeca-5,9-dien-2-one; [geranyl acetone]	C ₁₃ H ₂₂ O	1453	-	0,51	-
64	Неидентифицированное m/z 178 [M+], 137 (100)		1454	0,68	-	0,91
65	7-этокси-4-метилхромен-2-он 7-ethoxy-4-methylchromen-2-one	C ₁₂ H ₁₂ O ₃	1464	-	0,18	-
66	Неидентифицированное m/z 183 [M+], 71 (100)		1465	0,12	-	0,13
67	8а-метил-4-метилен-6-пропан-2-илиден-2,3,4а,5,7,8-гексагидро-1Н-нафтаден 8a-methyl-4-methyldiene-6-propan-2-ylidene-2,3,4a,5,7,8-hexahydro-1H-naphthalene	C ₁₅ H ₂₄	1469	-	0,23	-
68	2,6-дитрет-бутил-4-гидрокси-4-метилциклогекса-2,5-диен-1-он 2,6-ditert-butyl-4-hydroxy-4-methylcyclohexa-2,5-dien-1-one	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	1470	0,03	0,12	0,16
69	(E)-4-(2,6,6-триметилциклогексен-1-ил)бут-3-ен-2-он; [β-ионон] (E)-4-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)but-3-en-2-one; [β-ionone]	C₁₃H₂₀O	1478	0,53	1,06	0,79
70	1,1,2,6-тетраметил-1,2-дигидронафтаден 1,1,2,6-tetramethyl-1,2-dihydronaphthalene	C ₁₄ H ₁₈	1493	0,13	0,04	-
71	пентадекан pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	1500	0,14	0,22	0,17
72	2,4-дитрет-бутилфенол 2,4-ditert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O	1512	0,25	0,34	0,18
73	8а-метил-3,4,4а,5,6,7-гексагидро-2Н-нафталин-1,8-дион 8a-methyl-3,4,4a,5,6,7-hexahydro-2H-naphthalene-1,8-dione	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	1514	0,43	0,66	0,41
74	1,4,5-триметилнафтаден 1,4,5-trimethylnaphthalene	C ₁₃ H ₁₄	1535	0,05	0,06	-
75	3-метилпентадекан 3-methylpentadecane	C ₁₆ H ₃₄	1565	0,06	0,09	-
76	додекановая кислота dodecanoic acid	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	1589	0,77	1,78	1,03
77	гексадекан hexadecane	C₁₆H₃₄	1600	1,12	0,65	1,12

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
78	(1S,4aR,7R,8aR)-1,4a-диметил-7-(проп-1-ен-2-ил)декагидронафтаден-1-ол (1S,4aR,7R,8aR)-1,4a-dimethyl-7-(prop-1-en-2-yl)decahydronaphthalen-1-ol	C ₁₅ H ₂₆ O	1640	-	0,38	-
79	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)		1651	0,23	0,10	0,26
80	трибутилфосфат tributylphosphat;	C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P	1664	-	0,35	-
81	1,1-ditolyethane 4,4'-(этан-1,1-диил)бис(метилбензен) 4,4'-(ethane-1,1-diyl)bis(methylbenzene)	C ₁₆ H ₁₈	1666	0,19	-	0,17
82	4-(2,6,6-триметилциклогексен-1-ил)бутановая кислота 4-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)butanoic acid	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	1674	0,18	0,19	0,15
83	(E)-гептадец-1-ен (E)-heptadec-1-ene	C ₁₇ H ₃₄	1678	0,18	0,40	0,19
84	1-метокси-4-(4-метилгекс-1-ен-2-ил)бензен 1-methoxy-4-(4-methylhex-1-en-2-yl)benzene	C ₁₄ H ₂₀ O	1684	0,04	0,06	-
85	Неидентифицированное m/z? [M+], 97 (100)		1686	0,08	0,04	0,14
86	гептадекан heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	1700	0,90	0,31	0,64
87	4a-метил-4,4a,9,10-тетрагидрофенантрен-2(3H)-он 4a-methyl-4,4a,9,10-tetrahydrophenanthren-2(3H)-one	C ₁₅ H ₁₆ O	1705	-	0,32	-
88	Неидентифицированное m/z 220 [M+], 149 (100)		1712	0,23	0,34	0,22
89	фенантрен phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	1743	0,21	0,50	0,22
90	2,6-дитрет-бутил-4-этилфенол 2,6-ditert-butyl-4-ethylphenol	C ₁₆ H ₂₆ O	1750	0,26	0,36	0,24
91	(2E)-2-(4,7-диметил-3,4,4a,5,6,8a-гексагидро-2H-нафтаден-1-илиден)пропан-1-ол (2E)-2-(4,7-dimethyl-3,4,4a,5,6,8a-hexahydro-2H-naphthalen-1-ylidene)propan-1-ol	C ₁₅ H ₂₄ O	1761	0,09	0,78	0,05
92	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)		1769	0,06	0,35	0,07
93	тетрадекановая кислота tetradecanoic acid	C₁₄H₂₈O₂	1778	4,43	8,33	3,24
94	Неидентифицированное m/z 248 [M+], 233 (100)		1808	0,04	-	-
95	Неидентифицированное m/z? [M+], 82 (100)		1815	0,05	0,14	-
96	5-[4-(2-метилпропил)фенил]-1,2-дигидропиразол-3-он 5-[4-(2-methylpropyl)phenyl]-1,2-dihydropyrazol-3-one	C ₁₃ H ₁₆ N ₂ O	1822	-	0,13	-
97	6,10,14-триметилпентадекан-2-он; [фитон] 6,10,14-trimethylpentadecan-2-one; [phytone]	C₁₈H₃₆O	1847	2,32	5,23	2,90
98	пентадекановая кислота pentadecanoic acid	C₁₅H₃₀O₂	1884	0,99	1,74	0,92
99	нонадекан nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	1900	0,07	0,10	0,14
100	7,9-дитрет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион 7,9-ditert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	1910	0,10	0,17	0,09
101	(5E,9E)-6,10,14-триметилпентадека-5,9,13-триен-2-он (5E,9E)-6,10,14-trimethylpentadeca-5,9,13-trien-2-one	C ₁₈ H ₃₀ O	1916	0,69	0,77	0,91
102	метилгексадеканоат methylhexadecanoate	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	1931	0,05	0,31	0,10
103	3,7,11,15-тетраметилгексадец-1-ен-3-ол; [изофитол] 3,7,11,15-tetramethylhexadec-1-en-3-ol; [isophytol]	C ₂₀ H ₄₀ O	1952	0,36	0,97	0,43

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
104	цис-9-гексадеценовая кислота cis-9-hexadecenoic acid	C₁₆H₃₀O₂	1961	1,53	5,43	0,77
105	гексадекановая кислота hexadecanoic acid	C₁₆H₃₂O₂	1988	42,53	23,39	29,46
106	(3R)-5-[(1S,4aS,8aS)-5,5,8a-триметил-2-метилен-3,4,4a,6,7,8-гексагидро-1H-нафтаден-1-ил]-3-метилпент-1-ен-3-ол; [маноол] (3R)-5-[(1S,4aS,8aS)-5,5,8a-trimethyl-2-methylidene-3,4,4a,6,7,8-hexahydro-1H-naphthalen-1-yl]-3-methylpent-1-en-3-ol; [manool]	C ₂₀ H ₃₄ O	2044	0,90	0,27	0,82
107	5-циклогексен-1-ил-5-этил-1,3-дiazинан-2,4,6-трион; [циклобарбитал] 5-cyclohexen-1-yl-5-ethyl-1,3-diazinane-2,4,6-trione; [cyclobarbitol]	C ₁₂ H ₁₆ N ₂ O ₃	2063	0,66	0,89	0,57
108	генэйкозан heneicosane	C₂₁H₄₄	2100	1,74	1,08	2,01
109	3,7,11,15-тетраметилгексадец-2-ен-1-ол; [фитол] (E,7R,11R)-3,7,11,15-tetramethylhexadec-2-en-1-ol; [phytol]	C₂₀H₄₀O	2120	2,10	2,25	4,14
110	(9Z,12Z)-октадека-9,12-диеновая кислота; [линолевая кислота] (9Z,12Z)-octadeca-9,12-dienoic acid; [linoleic acid]	C₁₈H₃₂O₂	2144	3,89	4,33	5,48
111	(9Z,12Z,15Z)-октадека-9,12,15-триеновая кислота; [α-линоленовая кислота] (9Z,12Z,15Z)-octadeca-9,12,15-trienoic acid; [α-linolenic acid]	C₁₈H₃₀O₂	2150	6,32	4,88	10,43
112	1-метил-7-пропан-2-илфенантрен; [ретен] 1-methyl-7-propan-2-ylphenanthrene; [retene]	C₁₈H₁₈	2199	1,00	0,46	-
113	эйкозаналь eicosanal	C ₂₀ H ₄₀ O	2224	0,40	0,54	0,69
114	трикозан tricosane	C₂₃H₄₈	2300	2,22	0,97	1,91
115	(E)-8-(2,5,5,8a-тетраметил-1,4,4a,6,7,8-гексагидронафтаден-1-ил)-6-метилокт-5-ен-2-ол (E)-8-(2,5,5,8a-tetramethyl-1,4,4a,6,7,8-hexahydronaphthalen-1-yl)-6-methyloct-5-en-2-ol	C ₂₃ H ₄₀ O	2328	0,23	0,43	0,12
116	5-метил-5-(4,8,12-триметилтридецил)оксолан-2-он 5-methyl-5-(4,8,12-trimethyltridecyl)oxolan-2-one	C ₂₁ H ₄₀ O ₂	2352	0,18	0,31	0,13
117	[(2E,6E,10E)-3,7,11,15-тетраметилгексадека-2,6,10,14-тетраенил]ацетат [(2E,6E,10E)-3,7,11,15-tetramethylhexadeca-2,6,10,14-tetraenyl]acetate	C ₂₂ H ₃₆ O ₂	2383	0,08	0,10	0,09
118	тетракозан tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	2400	0,12	-	0,10
119	докозаналь docosanal	C ₂₂ H ₄₄ O	2427	0,08	0,15	0,40
120	1-докозанол 1-docosanol	C ₂₂ H ₄₆ O	2459	0,19	0,14	0,10
121	пентакозан pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	2500	0,28	0,18	0,61
122	3-этилпентакозан 3-ethylpentacosane	C ₂₇ H ₅₆	2660	0,27	0,16	-
123	гептакозан heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	2700	0,16	0,09	-

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
124	(6E, 10E, 14E, 18E)-2,6, 10, 15, 19, 23-гексаметилтетракоза-2,6, 10, 14, 18, 22-гексаен; [сквален] (6E, 10E, 14E, 18E)-2,6, 10, 15, 19, 23-hexamethyltetracos-2,6, 10, 14, 18, 22-hexaene; [squalene]	$C_{30}H_{50}$	2823	0,42	0,70	0,60
Всего соединений / общих Total compounds / common				107/75	110/75	87/75
Всего мажорных соединений / общих Total major compounds / common				15/9	16/9	14/9
Доля мажорных соединений, % The proportion of the major compounds, %				77,16	69,70	71,27
Доля общих мажорных соединений, % The proportion of common major compounds, %				68,99	54,96	64,96
Мажорные соединения, мкг/г сухой массы растения Major compounds, µg/g dry weight of the plant				98,79	102,49	29,53
ВСЕГО: С, мкг/г сухой массы растения TOTAL: C, µg/g dry weight of the plant				128,03	147,03	41,43

Примечание. RI – индекс удерживания; % – процентное содержание вещества от суммы всех веществ эфирного масла; С – абсолютное содержание веществ. Для некоторых соединений в квадратных скобках указаны тривиальные или наиболее часто употребляемые наименования. Полу жирным выделены мажорные соединения, доля которых (хотя бы для одного образца) превышала 1 %. Прочерк означает отсутствие компонента.

Note. RI – retention index; % – the percentage of the substance of the sum of all essential oil substances; C – the absolute content of substances. Trivial or most commonly used names are given in square brackets for some compounds; major compounds (the proportion of which for at least one sample exceeded 1 %) are highlighted in bold; a dash indicates the absence of a component.

также отличалась незначительно – 128,03 и 147,03 мкг/г сух. м. В образце же *P. amphibia* из шхер у п. Ляскеля было обнаружено всего 87 НОС, а их суммарное содержание составило лишь 41,43 мкг/г сух. м., что в 3–3,5 раза ниже, чем в двух других местообитаниях. Вероятнее всего, это связано с фактом интенсивного загрязнения данного местообитания в недавнем прошлом стоками деревообрабатывающих производств (в настоящее время закрытых или реконструированных). Возможно, менее интенсивное загрязнение сохраняется и по сей день. Известно, что у наземных растений уменьшается количество и снижается качество эфирного масла при увеличении антропогенного воздействия и ухудшении условий произрастания [Сотникова, Степень, 2001; Степень, Есякова, 2007; Марчук, Ежов, 2011; Тихонова и др., 2012; Опекунова и др., 2013]. По-видимому, данная закономерность характерна и для водных растений.

При сравнении содержания основных групп соединений в образцах горца земноводного из разных мест обитания в Ладожском озере (табл. 3) оказалось, что среди НОС из всех образцов *P. amphibia* наиболее обильной группой были жирные кислоты (50,1–60,6 %).

Значительная доля суммарного содержания НОС приходилась на альдегиды, углеводороды и кетоны (табл. 3). Заметного преобладания ка-

кой-либо группы НОС в популяции горца из местообитания с повышенным антропогенным воздействием (Ляскеля) не выявлено. Можно только отметить отсутствие азотсодержащих и фосфорсодержащих соединений у *P. amphibia* из данного биотопа в Ладожском озере.

Оценка сходства компонентного состава эфирных масел образцов *P. amphibia* в целом показала высокую степень сходства НМ из трех исследованных местообитаний. Когда учитывалось только наличие или отсутствие компонента (сходство по индексам Жаккара и Съеренсена – Чекановского), оказалось, что наиболее сходны были составы НМ горца земноводного, произраставшего у г. Питкяранта и п. Сорола (табл. 4). НМ горца из биотопа, который подвергался токсическому воздействию отходов деревообрабатывающих производств (Ляскеля), характеризовался наименьшим сходством с образцами из двух других биотопов. Если учитывать только мажорные компоненты, то более сходны были НМ горца в парах Питкяранта-Ляскеля и Сорола-Ляскеля и наименее сходны у растений из Питкяранта и Сорола (табл. 4). Похожий результат получен при использовании индекса Мориситы с учетом концентраций всех НОС и мажорных компонентов. Таким образом, мажорные компоненты, на долю которых приходилось от 70 до 77 % содержания в эфирном масле исследованных образцов, оказы-

Таблица 3. Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) и концентрация (С, мкг/г сухой массы растения) основных групп соединений в образцах *P. amphibia* из разнотипных местообитаний в Ладожском озере

Table 3. Comparative content (% in relation to whole essential oil) and concentration (C, µg/g of dry plant mass) of the main groups of compounds in *P. amphibia* samples from different habitats in Lake Ladoga

Группа соединений Chemical group	Питкяранта Pitkyaranta		Сорола Sorola		Ляскеля Lyaskelya	
	%	С	%	С	%	С
жирные кислоты Carboxylic acids	60,63	77,63	50,09	73,64	51,47	21,32
альдегиды Aldehydes	8,92	11,42	11,28	16,59	13,98	5,79
углеводороды Hydrocarbons	8,85	11,33	6,32	9,30	9,21	3,82
кетоны Ketones	6,81	8,72	13,98	20,56	7,49	3,10
спирты Alcohols	5,80	7,42	7,82	11,50	7,47	3,10
неидентифицированные соединения Unidentified compounds	3,49	4,47	1,37	2,01	2,82	1,17
ароматические углеводороды AromaticHydrocarbons	2,68	3,43	2,88	4,24	1,97	0,82
серосодержащие соединения Sulfur-containing compounds	0,97	1,24	2,09	3,08	1,23	0,51
полифункциональные соединения Diverse functional groups	0,88	1,12	1,60	2,35	0,66	0,27
эферы Esters	0,68	0,87	1,70	2,50	2,20	0,91
фенолы Phenols	0,25	0,32	0,34	0,50	1,48	0,61
азотсодержащие соединения Nitrogen-containing compounds	0,05	0,07	0,17	0,25	0,00	0,00
фосфорсодержащие соединения Phosphorus-containing compounds	0,00	0,00	0,35	0,52	0,00	0,00
ВСЕГО TOTAL	100,00	128,03	100,00	147,03	100,00	41,43

Таблица 4. Сходство НМ *P. amphibia* из разных местообитаний в Ладожском озере по индексам сходства Жаккара (J_1 – по всем соединениям, J_2 – по мажорным соединениям), Сьёренсена – Чекановского (Ks_1 – по всем соединениям, Ks_2 – по мажорным соединениям) и по индексу Мориситы – Хорна (Cmh_1 – для групп соединений, Cmh_2 – для всех соединений)

Table 4. The similarity of the low molecular weight metabolome of *P. amphibia* from different habitats in Lake Ladoga according to the Jaccard similarity indices (J_1 for all compounds, J_2 for major compounds), Sorensen-Czekanowski similarity indices (Ks_1 for all compounds, Ks_2 for major compounds) and Morisita-Horn index (Cmh_1 for groups of compounds, Cmh_2 for all compounds)

	J_1	J_2	Ks_1	Ks_2	Cmh_1	Cmh_2
Питкяранта-Сорола Pitkyaranta-Sorola	0,81	0,55	0,89	0,71	0,97	0,84
Питкяранта-Ляскеля Pitkyaranta-Lyaskelya	0,72	0,61	0,84	0,76	0,98	0,93
Сорола-Ляскеля Sorola-Lyaskelya	0,64	0,61	0,78	0,76	0,99	0,92

вали наибольшее влияние на оценку сходства НМ горца из разных местообитаний, если учитывать количественное содержание отдельных НОС в эфирном масле. Наиболее сильные различия между местообитанием с ток-

сическим загрязнением (Ляскеля) и другими местообитаниями получены при использовании индексов Жаккара и Сьёренсена – Чекановского при качественном анализе полного состава НМ.

Таблица 5. Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) соединений, входящих в состав пяти наиболее значимых мажорных компонентов НМ *P. amphibia* (место по значимости указано в скобках)

Table 5. Comparative content (% in relation to whole essential oil) of the compounds included in the 5 most significant major components of the low molecular weight metabolome of *P. amphibia* (the place in importance is indicated in brackets)

	Питкяранта Pitkyaranta	Сорола Sorola	Ляскеля Lyaskelya
гексадекановая кислота hexadecanoic acid	42,53 (1)	23,39 (1)	29,46 (1)
(9Z, 12Z, 15Z)-октадека-9, 12, 15-триеновая кислота; [α-линоленовая кислота] (9Z, 12Z, 15Z)-octadeca-9, 12, 15-trienoic acid; [α-linolenic acid]	6,32 (2)	4,88 (5)	10,43 (2)
тетрадекановая кислота tetradecanoic acid	4,43 (3)	8,33 (2)	-
гексаналь hexanal	3,93 (4)	-	4,28 (4)
(9Z, 12Z)-октадека-9, 12-диеновая кислота; [линолевая кислота] (9Z, 12Z)-octadeca-9, 12-dienoic acid; [linoleic acid]	3,89 (5)	-	5,48 (3)
цис-9-гексадеценная кислота cis-9-hexadecenoic acid	-	5,43 (3)	-
6, 10, 14-триметилпентадекан-2-он 6, 10, 14-trimethylpentadecan-2-one	-	5,23 (4)	-
3, 7, 11, 15-тетраметилгексадец-2-ен-1-ол; [фитол] (E, 7R, 11R)-3, 7, 11, 15-tetramethylhexadec-2-en-1-ol; [phytol]	-	-	4,14 (5)

Примечание. Прочерк означает, что соединение не входит в состав пяти наиболее значимых компонентов.

Note. A dash means that the compound is not part of the 5 most significant components.

В табл. 5 представлены пять наиболее значимых (% по отношению к цельному эфирному маслу) мажорных компонентов НМ исследованных образцов горца земноводного из Ладожского озера. Первое место во всех случаях занимала гексадекановая кислота. Причем в НМ *P. amphibia* из биотопа у г. Питкяранта на ее долю в составе всех компонентов приходилось более 42 %. В образцах из Соролы и Ляскеля ее доля также была значительна – 23,39 и 29,46 % (табл. 5). Следует отметить, что карбоновые кислоты во всех образцах горца занимали лидирующие места: гексадекановая кислота – три первых места, α-линоленовая кислота – два вторых места, тетрадекановая кислота – второе и третье место, линолевая кислота и цис-9-гексадеценная кислота – по одному третьему месту (табл. 5, рис. 3).

Как уже известно, карбоновые кислоты играют значительную роль в водных экосистемах прежде всего как активные аллелохимики [Negazy et al., 2001; Nakai et al., 2005; Hu, Hong, 2008; Sun et al., 2016; Zuo et al., 2016; Kurashov et al., 2018], подавляя развитие планктонных водорослей и цианобактерий.

Такой существенный синтез жирных кислот горцем земноводным указывает на то, что его зачастую очень хорошо развитые ассоциации оказывают значительное воздействие на фитопланктон в литорали Ладожского озера в ходе аллелопатических взаимодействий.

Кроме карбоновых кислот в пятерке наиболее обильных мажорных компонентов были представлены гексаналь (два 4-х места), 6,10,14-триметилпентадекан-2-он (одно 4-е место) и фитол (одно 5-е место) (табл. 5).

Обладающий травяным запахом гексаналь обнаруживается среди летучих НОС у многих наземных [Zhou et al., 2011] и водных [Walsh et al., 1998; Kurashov et al., 2014] растений, а также у грибов [Secondary..., 2008].

У водных растений функциональная роль гексаналя, а также других альдегидов, изучена очень слабо. Однако известно, что они выполняют разнообразные экологические и биологические функции, из которых наиболее важны регуляторная, сигнальная, защитная, отпугивающая и привлекающая [Fall et al., 1999; Hu et al., 2008; Arimura et al., 2009; Watson et al., 2009; Jüttner et al., 2010].

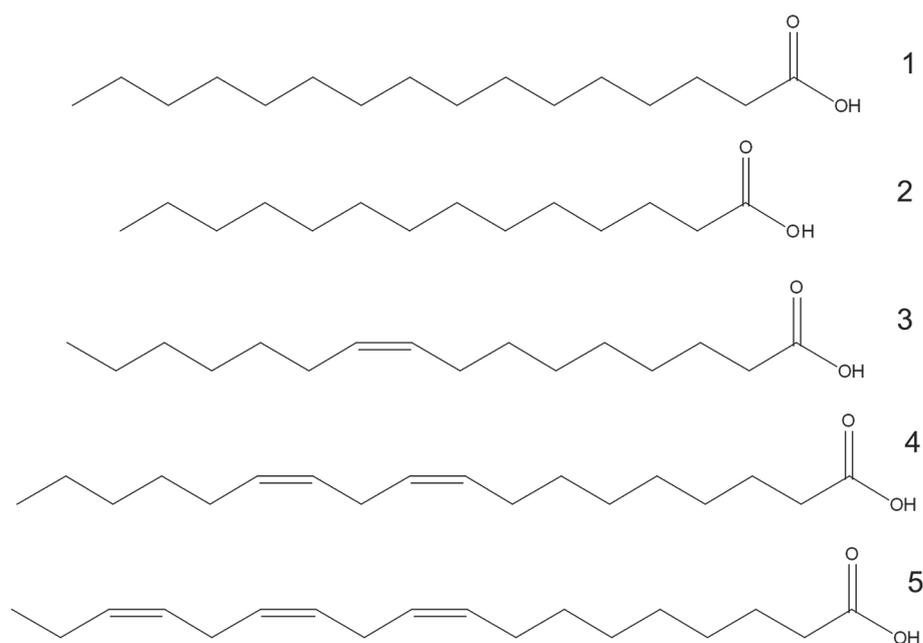


Рис. 3. Наиболее обильные предельные и ненасыщенные карбоновые кислоты в НМ образцов *P. amphibia* в Ладожском озере: 1 – гексадекановая кислота; 2 – тетрадекановая кислота; 3 – цис-9-гексадеценная кислота; 4 – линолевая кислота; 5 – α-линоленовая кислота

Fig. 3. The most abundant saturated and unsaturated fatty acids in low molecular weight metabolome of *P. amphibia* in Lake Ladoga: 1 – hexadecanoic acid; 2 – tetradecanoic acid; 3 – cis-9-hexadecenoic acid; 4 – linoleic acid; 5 – α-linolenic acid

Соединение 6,10,14-триметилпентадекан-2-он может служить индикатором происхождения органического вещества в озерных осадках из сосудистых растений [Wenchuan et al., 1999]. Помимо горца земноводного это биологически активное соединение может входить в состав мажорных НОС также и у других водных макрофитов (например, *Nuphar lutea* (L.) Sm., виды рода *Potamogeton*) [Kurashov et al., 2016]. Однако роль данного соединения в водных экосистемах не изучена.

Помимо упомянутых выше среди мажорных НОС горца земноводного обнаружены и другие интересные биологически активные метаболиты, которые могут оказывать определенное воздействие на сосуществующие с *P. amphibia* виды в озерном гидробиоценозе.

Так, по аналогии с другими индазолами [Chattha et al., 2013], синтезируемый горцем 1,3-бензотиазол может выступать как аллелохемик и ингибировать рост других растений и водорослей. Кроме того, данное соединение обладает выраженной антимикробной активностью [Soni et al., 2010].

Заслуживает внимания обнаружение среди НОС горца земноводного (в двух образцах из трех) такого соединения, как ретен (1-метил-7-пропан-2-илфенантрен). Ретен используется в качестве биомаркера исключительно

хвойных растений при палеогеографических реконструкциях, а его повышенные концентрации связывают с возрастанием доли хвойных растений в составе исходного органического вещества [Остроухов и др., 2013; Бушнев и др., 2016]. До настоящего времени данное соединение не обнаруживалось у водных растений. По последним сведениям, ретен также способен синтезировать глубинные микроорганизмы Байкала и он является биомаркером «молодой» байкальской нефти [Павлова, Букин, 2016].

Таким образом, ретен, по-видимому, не является исключительным индикатором хвойных, а его нахождение в природе может быть связано с функционированием и других организмов.

Заключение

Впервые проведенное хромато-масс-спектрометрическое исследование НМ горца земноводного, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского озера, позволило выявить качественный и количественный компонентный состав НОС его НМ. Обнаружение преобладания карбоновых кислот (50–60 % по содержанию) и других биологически активных НОС свидетельствует о выраженном влиянии данного растения на гидробиоценозы литорали Ладоги. НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прош-

лом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107 и 114) и их общим содержанием – в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях. Следует признать актуальным дальнейшее изучение НМ *P. amphibia*, в том числе и из других биотопов в Ладожском озере, а также других водоемов, наряду со сравнением водной и наземной форм горца по содержанию НОС для прояснения вопроса о закономерностях изменения его НМ под воздействием природных и антропогенных факторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по темам №№ 0154-2019-0001 и 0154-2019-0002.

Литература

- Бушнев Д. А., Валяева О. В., Котик И. С., Бурдельная Н. С., Бурцев И. Н. Состав биомаркеров битумоидов из углей и вмещающих отложений северо-востока Печорского угольного бассейна // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2016. № 6(258). С. 3–10.
- Горец земноводный // Энциклопедия лекарственных растений [Электронный ресурс]. URL: http://medgrasses.ru/gorez_zemnovodny.html (дата обращения: 04.09.2019).
- ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла.
- Гуревич Ф. А. Роль фитонцидов во внутренних водоемах // Водные ресурсы. 1978. № 2. С. 133–142.
- Кашина Л. И., Тупицына Н. Н. Сем. Polygonaceae – гречишные // Флора Сибири. Новосибирск: Наука, 1992. Т. 5. С. 106–108.
- Крылова Ю. В., Курашов Е. А., Митрукова Г. Г. Компонентный состав летучих низкомолекулярных органических соединений *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae), произрастающего в различных климатических условиях // Вода: химия и экология. 2016. № 8. С. 11–25.
- Марчук Н. Ю., Ехов В. Н. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла *Cupressus sempervirens* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. Биология, химия. 2011. Т. 24, № 4. С. 151–155.
- Олекунова М. Г., Крылова Ю. В., Курашов Е. А., Чихачева А. Ю. Изменение качества лекарственных растений *Thymus marschallianus* Willd. и *Salvia steprosa* Schost. под воздействием загрязнения тяжелыми металлами на Южном Урале // Бюллетень Брянского отделения РБО. 2013. № 2. С. 97–112.
- Остроухов С. Б., Цыганкова В. А., Попова П. Ф. Биомаркеры (кадален и ретен) юрско-меловых отложений Северного Каспия и возможности их использования при палеогеографических реконструкциях // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всерос. литолог. совещ. (Новосибирск, 28–31 окт. 2013 г.). Т. 2. Новосибирск, 2013. С. 356–359.
- Павлова О. Н., Букин С. В. «Пришельцы» Байкала // Наука из первых рук. 2016. № 3(69). С. 50–55.
- Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 197 с.
- Сотникова О. В., Степень Р. А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 79–84.
- Степень Р. А., Есякова О. А. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла хвои ели // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 1. С. 122–127.
- Тихонова И. В., Анискина А. А., Мухортова Л. В., Лоскутов С. Р. Индивидуальная изменчивость состава летучих выделений хвои сосны обыкновенной в популяциях Хакасии и Тувы // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 19, № 3. С. 397–405.
- Ткачев А. В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: Офсет, 2008. 969 с.
- Aasim M., Khawar K. M., Ahmed S. I., Karataş M. Multiple uses of some important aquatic and semiaquatic medicinal plants // Plant and Human Health. 2019. Vol. 2. P. 541–577.
- Abbasi A. M., Shah M. H., Khan M. Phytochemical contents of wild edible vegetables // Wild edible vegetables of Lesser Himalayas: Ethnobotanical and nutraceutical aspects. 2015. Vol. 1. P. 237–284. doi: 10.1007/978-3-319-09543-1_7
- Arimura G., Matsui K., Takabayashi J. Chemical and molecular ecology of herbivore – induced plant volatiles: Proximate factors and their ultimate functions // Plant Cell Physiol. 2009. Vol. 50, no. 5. P. 911–923. doi: 10.1093/pcp/pcp030
- Baharum S. N., Azizan K. A. Metabolomics in systems biology // Omics Applications for Systems Biology / Eds. W. M. Aizat et al. Advances in Experimental Medicine and Biology. Vol. 1102. Springer Nature Switzerland AG, 2018. P. 51–68.
- Chattha F. A., Munawar M. A., Nagra S. A., Ashraf M., Khan M. A., Kosur S. Synthesis of 3-Aryl-1H-Indazoles and their effects on plant growth // J. Plant Growth Regulation. 2013. Vol. 32. P. 291–297. doi: 10.1007/s00344-012-9297-1
- Christopher P., Parasuraman S., Christina J. A., Vinkneswaran M., Asmawi M. Z. Review on Polygonum minus. Huds, a commonly used food additive in Southeast Asia // Pharmacognosy Research. 2015. Vol. 7(1). P. 1–6. doi: 10.4103/0974-8490.147125
- Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz // Anthropol. Anz. 1922. Vol. 9. P. 227–249.
- Duke J. A. Duke's handbook of medicinal plants of Latin America. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 832 p. doi: 10.1201/9781420043174
- Fall R., Karl T., Hansel A., Jordan A., Lindinger W. Volatile organic compounds emitted after leaf wounding: On-line analysis by proton-transfer-reaction mass spec-

- trometry // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, iss. D13. P. 15963–15974. doi: 10.1029/1999JD900144
- Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems // Mar. Freshwat. Behav. Physiol. 2007. Vol. 40, no. 3. P. 155–168. doi: 10.1080/10236240701602218
- Han P., Huang Y., Xie Y., Yang W., Xiang W., Hylands P. J., Legid-Quigley C. Metabolomics reveals immunomodulation as a possible mechanism for the antibiotic effect of *Persicaria capitata* (Buch.-Ham. ex D. Don) H. Gross // Metabolomics. 2018. Vol. 14, no. 91. P. 1–9. doi: 10.1007/s11306-018-1388-y
- Hao D. C., Gu X.-J., Xiao P. G. Phytochemical and biological research of Polygoneae medicinal resources // Medicinal Plants. Chemistry, Biology and Omics. 2015. P. 465–529. doi: 10.1016/B978-0-08-100085-4.00012-8
- Hegazy A. K., Amer W. M., Khedr A. A. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta) // Hydrobiologia. 2001. Vol. 464. P. 133–142. doi: 10.1023/A:1013943318230
- Hinds H. R., Freeman C. C. *Persicaria* (L.) Mill. // Flora of North America North of Mexico: Magnoliophyta: Caryophyllidae (part 2). Vol. 5 (Flora of North America Editorial Committee, ed.). New York; Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 574–594.
- Hu H., Hong Y. Algal – bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review // Front. Environ. Sci. Engin. China. 2008. Vol. 2, no. 4. P. 421–438. doi: 10.1007/s11783-008-0070-4
- Hu Z., Shen Y., Luo Y., Shen F., Gao H., Gao R. Aldehyde volatiles emitted in succession from mechanically damaged leaves of poplar cuttings // J. Plant Biol. 2008. Vol. 51, no. 4. P. 269–275.
- Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines // Bull. Soc. Vaudoise Sci. Natur. 1901. Vol. 37. Bd. 140. P. 241–272.
- Jüttner F., Messina P., Patalano C., Zupo V. Odour compounds of the diatom *Cocconeis scutellum*: effects on benthic herbivores living on *Posidonia oceanica* // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2010. Vol. 400. P. 63–73. doi: 10.3354/meps08381
- Kurashov E. A., Fedorova E. V., Krylova J. V., Mitrukova G. G. Assessment of the potential biological activity of low molecular weight metabolites of freshwater macrophytes with QSAR // Scientifica. 2016. Vol. 2016. Article ID 1205680. 9 p. doi: 10.1155/2016/1205680
- Kurashov E. A., Krylova J. V., Mitrukova G. G., Chernova A. M. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, no. 4. P. 433–448. doi: 10.1134/S1995425514040064
- Kurashov E. A., Mitrukova G. G., Krylova Yu. V. Inter-annual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a floodplain lake with a changeable trophic status // Contemp. Probl. Ecol. 2018. Vol. 11, no. 2. P. 179–194. doi: 10.1134/S1995425518020063
- Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities // Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology). 1959. No. 3. P. 65–80.
- Nakai S., Yamada S., Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* // Hydrobiologia. 2005. Vol. 543. P. 71–78. doi: 10.1007/s10750-004-6822-7
- Persicaria* // Plants of the world online [Электронный ресурс]. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:60433517-2> (дата обращения: 03.11.2019).
- Prota N., Mumm R., Bouwmeester H. J., Jongsma M. A. Comparison of the chemical composition of three species of smartweed (genus *Persicaria*) with a focus on drimane sesquiterpenoids // Phytochemistry. 2014. Vol. 108. P. 129–136. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.10.001
- Rahnamaie-Tajadod R., Goh H.-H., Noor N. M. Methyl jasmonate-induced compositional changes of volatile organic compounds in *Polygonum minus* leaves // J. Plant Physiol. 2019. Vol. 240. Article 152994. doi: 10.1016/j.jplph.2019.152994
- Secondary Metabolites in soil ecology / Ed. P. Karlovsky. Soil Biology. Vol. 14. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 293 p.
- Soni B., Ranawat M. S., Sharma R., Bhandari A., Sharma S. Synthesis and evaluation of some new benzothiazole derivatives as potential antimicrobial agents // Eur. J. Med. Chem. 2010. Vol. 45, no. 7. P. 2938–2942. doi: 10.1016/j.ejmech.2010.03.019
- Sorensen T. A. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, and its application to analyses of the vegetation on Danish com – mons // Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter. 1948. Vol. 5. P. 1–34.
- Sun X., Jin H., Zhang L., Hu W., Li Y., Xu N. Screening and isolation of the algicidal compounds from marine green alga *Ulva intestinalis* // Chin. J. Ocean. Limnol. 2016. Vol. 34. P. 781–788. doi: 10.1007/s00343-016-4383-z
- Swapna M. M., Prakashkumar R., Anoop K. P., Manju C. N., Rajith N. P. A review on the medicinal and edible aspects of aquatic and wetland plants of India // J. Med. Plants Res. 2011. Vol. 5, no. 33. P. 7163–7176.
- Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for ecdysteroids // Biochem. Syst. Ecol. 2002. Vol. 30. P. 525–578.
- Walsh K., Jones G. J., Dunstan R. H. Effect of high irradiance and iron on volatile odour compounds in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* // Phytochemistry. 1998. Vol. 49, no. 5. P. 1227–1239. doi: 10.1016/S0031-9422(97)00943-6
- Watson S. B., Caldwell G., Pohnert G. Fatty acids and oxylipins as semiochemicals // Lipids in Aquatic Ecosystems. Springer, 2009. P. 65–91.
- Wenchuan Q., Dickman M., Sumin W., Ruijin W., Pingzhong Z., Jianfa C. Evidence for an aquatic plant origin of ketones found in Taihu Lake sediments // Hydrobiologia. 1999. Vol. 397. P. 149–154. doi: 10.1023/A:1003624625076
- Zheng L., Lu Y., Cao X., Huang Y., Liu Y., Tang L., Wang Y.-L. Evaluation of the impact of *Polygonum capitatum*, a traditional Chinese herbal medicine, on rat

hepatic cytochrome P450 enzymes by using a cocktail of probe drugs // J. Ethnopharmacol. 2014. Vol. 158. P. 276–282. doi: 10.1016/j.jep.2014.10.031

Zhou J., Xie G., Yan X. Encyclopedia of traditional Chinese medicines. Molecular structures, pharmacological activities, natural sources and applications. Vol. 6: Indexes. Springer, 2011. 730 p. doi: 10.1007/978-3-642-16744-7

References

Bushnev D. A., Valyaeva O. V., Kotik I. S., Burdel'naya N. S., Burtsev I. N. Sostav biomarkerov bitumoidov iz uglei i vmeshchayushchikh otlozhenii severo-vostoka Pechorskogo ugol'nogo basseina [Composition of biomarkers of bitumen from coal and host deposits of the north-east of the Pechora coal basin]. *Vestnik Inst. geol. Komi nauch. tsentra Ural'skogo otd. RAN* [Bull. Inst. Geol., Komi Sci. Center, Ural Br. RAS]. 2016. No. 6(258). P. 3–10.

GOST 24027.2-80. Syr'e lekarstvennoe rastitel'noe. Metody opredeleniya vlazhnosti, sodержaniya zoly, ekstraktivnykh i dubil'nykh veshchestv, efirnogo masla [GOST 24027.2-80. Herbal raw materials. Methods for determining humidity, ash content, extractive and tannins, essential oils].

Gorets zemnovodnyi [Water smartweed]. *Entsiklopediya lekarstvennykh rastenii* [Encyclopedia of Medicinal Plants]. URL: http://medgrasses.ru/gorez_zemnovodny.html (accessed: 04.09.2019).

Gurevich F. A. Rol' fitontsidov vo vnutrennikh vodoe-makh [The role of phytoncides in inland waters]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1978. No. 2. P. 133–142.

Kashina L. I., Tupitsyna N. N. Sem. Polygonaceae – grechishnye [Polygonaceae – Buckwheat]. *Flora Sibiri* [Siberian Flora]. Novosibirsk, 1992. Vol. 5. P. 106–108.

Krylova J. V., Kurashov E. A., Mitrukova G. G. Komponentnyi sostav letuchikh nizkomolekulyarnykh organicheskikh soedinenii *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae), proizrastayushchego v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Component composition of the low molecular weight volatile organic compounds of *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) growing in different climatic conditions]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2016. No. 8. P. 11–25.

Marchuk N. Yu., Ezhov V. N. Vliyanie antropogennogo zagryazneniya sredy na sodержanie i sostav efirnogo masla *Cupressus sempervires* L. [Influence of anthropogenic pollution of the environment on the content and composition of essential oil of *Cupressus sempervires* L.]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo nats. univ. im. V. I. Vernadskogo. Ser. Biol., khimiya* [Proceed. V. I. Vernadsky Taurida National Univ. Ser. Biol. Chem.]. 2011. Vol. 24, no. 4. P. 151–155.

Opekunova M. G., Krylova Yu. V., Kurashov E. A., Chikhacheva A. Yu. Izmenenie kachestva lekarstvennykh rastenii *Thymus marschallianus* Willd. i *Salvia stepposa* Schost. pod vozdeistviem zagryazneniya tyazhelymi metallami na Yuzhnom Urale [Change in the quality of medicinal plants *Thymus marschallianus* Willd. and *Salvia stepposa* Schost. under the influence of heavy metal pollution in the South Urals]. *Byull. Bryanskogo otd. Russ. botanich. obshchestva* [Bull.

Zuo S., Zhou S., Ye L., Ding Y., Jiang X. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. Vol. 23. P. 15703–15711. doi: 10.1007/s11356-016-6770-6

Поступила в редакцию 12.10.2019

Bryansk Br. Russian Botanical Society]. 2013. No. 2. P. 97–112.

Ostroukhov S. B., Tsygankova V. A., Popova P. F. Biomarkery (kadalen i reten) yursko-melovykh otlozhenii Severnogo Kaspiya i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya pri paleogeograficheskikh rekonstruktsiyakh [Biomarkers (cadalene and retene) of Jurassic-Cretaceous deposits of the Northern Caspian and the possibilities of their use in paleogeographic reconstructions]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geol. istorii: Mat. VII Vseros. litolog. soveshch.* (Novosibirsk, 28–31 okt. 2013 g.) [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geol. history. Proceed. VII All-Russ. lithol. meeting (Novosibirsk, Oct. 28–31, 2013)]. Novosibirsk, 2013. Vol. 2. P. 356–359.

Pavlova O. N., Bukin S. V. "Prishel'tsy" Baikala ["Aliens" of Lake Baikal]. *Nauka iz pervykh ruk* [First-hand Sci.]. 2016. No. 3(69). P. 50–55.

Raspopov I. M. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' bol'shikh ozer Severo-Zapada SSSR [Higher aquatic vegetation of large lakes of the North-West of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1985. 197 p.

Sotnikova O. V., Stepen' R. A. Efirnye masla sosny kak indikator zagryazneniya sredy [Essential oils of pine as an indicator of environmental pollution]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials]. 2001. No. 3. P. 79–84.

Stepen' R. A., Esyakova O. A. Vliyanie antropogennogo zagryazneniya sredy na sodержanie i sostav efirnogo masla khvoi eli [Influence of anthropogenic pollution on the content and composition of pine needles essential oil]. *Khvoinye boreal'noi zony* [Coniferous of the Boreal Zone]. 2007. Vol. 24, no. 1. P. 122–127.

Tikhonova I. V., Aniskina A. A., Mukhortova L. V., Loskutov S. R. Individual variability in the composition of volatile secretions of scots pine needles in populations of Khakassia and Tuva. *Contemp. Probl. Ecol.* 2012. Vol. 5, no. 3. P. 292–299. doi: 10.1134/S1995425512030171

Tkachev A. V. Issledovanie letuchikh veshchestv rastenii [Study of volatile substances of plants]. Novosibirsk: Offset, 2008. 969 p.

Aasim M., Khawar K. M., Ahmed S. I., Karataş M. Multiple uses of some important aquatic and semi-aquatic medicinal plants. *Plant and Human Health.* 2019. Vol. 2. P. 541–577.

Abbasi A. M., Shah M. H., Khan M. Phytochemical contents of wild edible vegetables. *Wild edible vegetables of Lesser Himalayas: Ethnobotanical and nutraceutical aspects.* 2015. Vol. 1. P. 237–284. doi: 10.1007/978-3-319-09543-1_7

- Arimura G., Matsui K., Takabayashi J. Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: Proximate factors and their ultimate functions. *Plant Cell Physiol.* 2009. Vol. 50, no. 5. P. 911–923. doi: 10.1093/pcp/pcp030
- Baharum S. N., Azizan K. A. Metabolomics in systems biology. Omics applications for systems biology. Eds. W. M. Aizat et al. *Advances in Experimental Medicine and Biology.* Vol. 1102. Springer Nature Switzerland AG, 2018. P. 51–68.
- Chattha F. A., Munawar M. A., Nagra S. A., Ashraf M., Khan M. A., Kosur S. Synthesis of 3-Aryl-1H-Indazoles and their effects on plant growth. *J. Plant Growth Regulation.* 2013. Vol. 32. P. 291–297. doi: 10.1007/s00344-012-9297-1
- Christopher P., Parasuraman S., Christina J. A., Vigneswaran M., Asmawi M. Z. Review on Polygonum minus. Huds, a commonly used food additive in Southeast Asia. *Pharmacognosy Research.* 2015. Vol. 7(1). P. 1–6. doi: 10.4103/0974-8490.147125
- Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz. *Anthropol. Anz.* 1922. Vol. 9. P. 227–249.
- Duke J. A. *Duke's handbook of medicinal plants of Latin America.* Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 832 p. doi: 10.1201/9781420043174
- Fall R., Karl T., Hansel A., Jordan A., Lindinger W. Volatile organic compounds emitted after leaf wounding: On-line analysis by proton-transfer-reaction mass spectrometry. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 15963–15974. doi: 10.1029/1999JD900144
- Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems. *Mar. Freshwat. Behave. Physiol.* 2007. Vol. 40, no. 3. P. 155–168. doi: 10.1080/10236240701602218
- Han P., Huang Y., Xie Y., Yang W., Xiang W., Hylands P. J., Legid-Quigley C. Metabolomics reveals immunomodulation as a possible mechanism for the antibiotic effect of *Persicaria capitata* (Buch.-Ham. ex D. Don) H. Gross. *Metabolomics.* 2018. Vol. 14(91). P. 1–9. doi: 10.1007/s11306-018-1388-y
- Hao D. C., Gu X.-J., Xiao P. G. Phytochemical and biological research of Polygoneae medicinal resources. *Medicinal Plants. Chemistry, Biology and Omics.* 2015. P. 465–529. doi: 10.1016/B978-0-08-100085-4.00012-8
- Hegazy A. K., Amer W. M., Khedr A. A. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta). *Hydrobiologia.* 2001. Vol. 464. P. 133–142. doi: 10.1023/A:1013943318230
- Hinds H. R., Freeman C. C. *Persicaria* (L.) Mill. Flora of North America North of Mexico: Magnoliophyta: Caryophyllidae (part 2). Vol. 5 (Flora of North America Editorial Committee, ed.). New York & Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 574–594.
- Hu H., Hong Y. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review. *Front. Environ. Sci. Engin. China.* 2008. Vol. 2, no. 4. P. 421–438. doi: 10.1007/s11783-008-0070-4
- Hu Z., Shen Y., Luo Y., Shen F., Gao H., Gao R. Aldehyde volatiles emitted in succession from mechanically damaged leaves of poplar cuttings. *J. Plant Biol.* 2008. Vol. 51, no. 4. P. 269–275.
- Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines. *Bull. Soc. Vaudoise Sci. Natur.* 1901. Vol. 37. Bd. 140. P. 241–272.
- Jüttner F., Messina P., Patalano C., Zupo V. Odour compounds of the diatom *Cocconeis scutellum*: effects on benthic herbivores living on *Posidonia oceanic*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2010. Vol. 400. P. 63–73. doi: 10.3354/meps08381
- Kurashov E. A., Krylova J. V., Mitrukova G. G., Chernova A. M. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems. *Contemp. Probl. Ecol.* 2014. Vol. 7, no. 4. P. 433–448. doi: 10.1134/S1995425514040064
- Kurashov E. A., Mitrukova G. G., Krylova Yu. V. Inter-annual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a floodplain lake with a changeable trophic status. *Contemp. Probl. Ecol.* 2018. Vol. 11, no. 2. P. 179–194. doi: 10.1134/S1995425518020063
- Kurashov E. A., Fedorova E. V., Krylova J. V., Mitrukova G. G. Assessment of the potential biological activity of low molecular weight metabolites of freshwater macrophytes with QSAR. *Scientifica.* 2016. Vol. 2016. Article ID 1205680. 9 p. doi: 10.1155/2016/1205680
- Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities. *Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology).* 1959. No. 3. P. 65–80.
- Nakai S., Yamada S., Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia.* 2005. Vol. 543. P. 71–78. doi: 10.1007/s10750-004-6822-7
- Persicaria.* *Plants of the world online.* URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:60433517-2> (accessed: 03.11.2019).
- Prota N., Mumm R., Bouwmeester H. J., Jongsmma M. A. Comparison of the chemical composition of three species of smartweed (genus *Persicaria*) with a focus on drimane sesquiterpenoids. *Phytochemistry.* 2014. Vol. 108. P. 129–136. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.10.001
- Rahnamaie-Tajadod R., Goh H.-H., Noor N. M. Methyl jasmonate-induced compositional changes of volatile organic compounds in *Polygonum minus* leaves. *J. Plant Physiol.* 2019. Vol. 240. Art. 152994. doi: 10.1016/j.jplph.2019.152994
- Secondary Metabolites in Soil Ecology.* Ed. P. Karlovsky. Soil Biology. Vol. 14. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 293 p.
- Soni B., Ranawat M. S., Sharma R., Bhandari A., Sharma S. Synthesis and evaluation of some new benzothiazole derivatives as potential antimicrobial agents. *Eur. J. Med. Chem.* 2010. Vol. 45(7). P. 2938–2942. doi: 10.1016/j.ejmech.2010.03.019
- Sorensen T. A. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter.* 1948. Vol. 5. P. 1–34.

Sun X., Jin H., Zhang L., Hu W., Li Y., Xu N. Screening and isolation of the algicidal compounds from marine green alga *Ulva intestinalis*. *Chin. J. Ocean. Limnol.* 2016. Vol. 34. P. 781–788. doi: 10.1007/s00343-016-4383-z

Swapna M. M., Prakashkumar R., Anoop K. P., Manju C. N., Rajith N. P. A review on the medicinal and edible aspects of aquatic and wetland plants of India. *J. Med. Plants Res.* 2011. Vol. 5, no. 33. P. 7163–7176.

Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for ecdysteroids. *Biochem. Syst. Ecol.* 2002. Vol. 30. P. 525–578.

Walsh K., Jones G. J., Dunstan R. H. Effect of high irradiance and iron on volatile odour compounds in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Phytochemistry.* 1998. Vol. 49. no. 5. P. 1227–1239. doi: 10.1016/s0031-9422(97)00943-6

Watson S. B., Caldwell G., Pohnert G. Fatty acids and oxylipins as semiochemicals. *Lipids in Aquatic Ecosystems*. Springer, 2009. P. 65–91.

Wenchuan Q., Dickman M., Sumin W., Ruijin W., Pingzhong Z., Jianfa C. Evidence for an aquatic plant

origin of ketones found in Taihu Lake sediments. *Hydrobiologia.* 1999. Vol. 397. P. 149–154. doi: 10.1023/A:1003624625076

Zheng L., Lu Y., Cao X., Huang Y., Liu Y., Tang L., Wang Y.-L. Evaluation of the impact of *Polygonum capitatum*, a traditional Chinese herbal medicine, on rat hepatic cytochrome P450 enzymes by using a cocktail of probe drugs. *J. Ethnopharmacol.* 2014. Vol. 158. P. 276–282. doi: 10.1016/j.jep.2014.10.031

Zhou J., Xie G., Yan X. Encyclopedia of traditional Chinese medicines. Molecular structures, pharmacological activities, natural sources and applications. Vol. 6: Indexes. Springer, 2011. 730 p. doi: 10.1007/978-3-642-16744-7.

Zuo S., Zhou S., Ye L., Ding Y., Jiang X. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. Vol. 23. P. 15703–15711. doi: 10.1007/s11356-016-6770-6

Received October 12, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Крылова Юлия Викторовна

и. о. заведующего лаб. рыбохозяйственной экологии, к. г. н., доцент
Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053
эл. почта: juliakrylova@mail.ru

Курашов Евгений Александрович

заведующий лаб. гидробиологии, д. б. н., проф.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
главный научный сотрудник
Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053
эл. почта: evgeny_kurashov@mail.ru

Русанов Александр Геннадьевич

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: a_rusanov@yahoo.com

CONTRIBUTORS:

Krylova, Julia

St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO (GosNIORKh named after L. S. Berg)
26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia
e-mail: juliakrylova@mail.ru

Kurashov, Evgeny

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO (GosNIORKh named after L. S. Berg)
26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia
e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

Rusanov, Alexander

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: a_rusanov@yahoo.com

УДК 574.5

К ВОПРОСУ О НОЧНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МИГРАЦИЯХ АМФИПОД В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

Д. Ю. Карнаухов¹, Е. А. Курашов^{2,3}

¹ НИИ биологии Иркутского государственного университета, Россия

² Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), Санкт-Петербург, Россия

Суточные вертикальные миграции (СВМ) амфипод – широко распространенное явление в реках, озерах и морях. Среди пресноводных водоемов по таким характеристикам, как число видов амфипод и интенсивность СВМ, на первое место выходит древнее оз. Байкал. В Ладожском озере также обитает несколько видов этих ракообразных, часть из которых являются вселенцами из Байкала. Исходя из этого, целью работы было выяснить, совершают ли амфиподы в Ладожском озере ночные вертикальные миграции. Для проверки данного предположения совместно использовались видеоборудование (видеосистема, состоящая из металлического каркаса, видеокамеры GoPro 4, трех осветительных элементов и термологгера iButton), планктонная сеть и дночерпатель. Сочетанием указанных методов удалось выявить наличие у амфипод из Ладожского озера вертикальных миграций в ночное время, однако интенсивность данных миграций крайне низка и наблюдается только у видов – вселенцев из оз. Байкал, *Gmelinoides fasciatus* и *Micruropus possolskii*. При сравнении интенсивности ночных вертикальных миграций на разных глубинах достоверных отличий не выявлено. Кроме амфипод в состав ночного миграционного комплекса Ладожского озера можно отнести представителей таких групп, как рыбы, хирономиды, водные клопы, мизиды, а также хищного ветвистоусого рачка *Leptodora kindtii* (Focke, 1844).

К л ю ч е в ы е с л о в а: амфиподы; вертикальные миграции; Ладожское озеро; ночной миграционный комплекс; *Gmelinoides fasciatus*; *Micruropus possolskii*.

D. Yu. Karnaukhov, E. A. Kurashov. ON NIGHTTIME VERTICAL MIGRATIONS OF AMPHIPODS IN LAKE LADOGA

Daily vertical migrations (DVM) of amphipods is a widespread phenomenon both in rivers and lakes, and in seas. The leader among freshwater bodies in terms of the number of amphipod species and the intensity of DVM is the ancient Lake Baikal. Lake Ladoga is also inhabited by several species of these crustaceans, and some of them are invaders from Lake Baikal. Therefore, the aim of this study was to check whether amphipods in Lake Ladoga perform nighttime vertical migrations. To test this assumption, we used a combination of video equipment (a video system consisting of a metal frame, a GoPro 4 video camera, 3 lighting elements, and an iButton temperature logger), a plankton net, and a bottom grab. Co-application of these methods did detect vertical nighttime migrations in amphipods in Lake Ladoga, but their intensity was extremely low and they were observed only in invasive species from Lake Baikal, *Gmelinoides fasciatus* and *Micruropus*

possolskii. A comparison of depth-specific intensities of vertical nighttime migrations revealed no significant variation. In addition to amphipods, the nighttime migrants community in Lake Ladoga includes representatives of such groups as fish, chironomids, water bugs, opossum shrimps, and predatory cladocera *Leptodora kindtii* (Focke, 1844).

Keywords: amphipods; vertical migrations; Lake Ladoga; nighttime migrants; *Gmelinoides fasciatus*; *Micruropus possolskii*.

Введение

Суточные вертикальные миграции (СВМ) гидробионтов являются широко распространенным явлением как в крупных [Грезе, 1965; Nishihama, Hirakawa, 1998; Тахтеев и др., 2014; Karnaukhov et al., 2016; Takhteev et al., 2019], так и в небольших [Лабай, Лабай, 2014] водоемах, а иногда встречаются даже в колодцах [Blinn et al., 1988]. В наибольшей степени данные миграции свойственны ракообразным, среди которых можно выделить такие группы, как: мизиды [Euclide et al., 2017], амфиподы [Fincham, 1970; Fernandez-Gonzalez et al., 2014], изоподы [Долинская и др., 2018], гарпактициды [Evstigneeva et al., 1991]. На сегодняшний день подобные миграции более подробно изучены у пелагиобионтов [Hays et al., 2001; Gauthier, Rose, 2002; Kringel et al., 2003; Iguchi, Ikeda, 2004; Elder, Seibel, 2015], а также выявлена их основная причина – защитно-пищевой фактор, согласно которому организмы в ночное время поднимаются в верхние слои воды для питания, а в дневное держатся в более глубоких слоях, скрываясь от хищников [Кожова, 1987].

В озере Байкал ввиду большого разнообразия обитающих в нем видов амфипод (61 % видов амфипод континентальных вод РФ [Takhteev et al., 2015]) наибольшему изучению подверглись СВМ именно этой группы [Тахтеев и др., 2014; Karnaukhov et al., 2016; Takhteev et al., 2019]. Подавляющее большинство амфипод в озере являются бентосными организмами. Относительно вертикальных миграций бентосных организмов общепринятой гипотезы на сегодняшний день не существует, а имеющиеся очень сильно разнятся в зависимости от водоема [Грезе, 1965; Кожова, 1987; Лабай, Лабай, 2014; Takhteev et al., 2019]. Для озера Байкал, например, такой гипотезой вертикальных миграций амфипод является «температурная» [Тахтеев и др., 2014], заключающаяся в необходимости неполовозрелых особей всплывать в верхние, более прогретые, слои воды для ускорения процесса полового созревания, хотя стоит отметить, что и данная гипотеза не лишена недостатков и, возможно, применима не ко всем родам мигрирующих

амфипод. В процессе изучения СВМ амфипод озера Байкал были описаны различные «картины» формирования в верхних слоях воды ночного миграционного комплекса (НМК), которые в основном зависят от различных абиотических факторов среды.

Фауна амфипод Ладожского озера в сравнении с таковой Байкала существенно более бедна. Кроме свойственных данному водоему видов *Monoporeia affinis* (Lindström, 1855), *Pallaseopsis quadrispinosa* (G. O. Sars, 1867), *Gammarocanthus (Relictocanthus) lacustris* (Sars, 1863)), недавних вселенцев понто-каспийского комплекса – *Pontogammarus robustoides* (Sars, 1894) и *Chelicorophium curvispinum* (Sars, 1895) она также включает байкальских амфипод-вселенцев: *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) и *Micruropus possolskii* (Sowinsky, 1915) [Курашов и др., 2012; Барбашова и др., 2013]. Изучение СВМ амфипод в Ладожском озере ранее не проводилось, но с учетом достаточно большого числа видов, включая двух представителей байкальской фауны, было высказано предположение, что данное явление может иметь место и в Ладожском озере. Следует отметить, что о важности такого явления, как горизонтальные миграции гидробионтов (в том числе амфипод) в Онежском и Ладожском озерах, писал в свое время И. И. Николаев [1975], отмечая, что горизонтальные миграции беспозвоночных нередко протекают сопряженно с вертикальными.

Исходя из этого, целью данной работы было выявить возможное наличие явления ночных вертикальных миграций (НВМ) амфипод в Ладожском озере, изучить миграционное поведение организмов в зависимости от различных абиотических факторов среды.

Материалы и методы

Исследование НВМ проводилось в ходе экспедиции по Ладожскому озеру на НИС «Посейдон» (июль–август 2019 г.) в прибрежных районах озера, а также в рамках ряда полевых выездов (апрель, август 2019 г.) в западную и южную части озера. Исследованные во время рейса точки различались по глубине и характеру донных отложений (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Характеристики точек проведения видеонаблюдений во время экспедиционного рейса

Table 1. Description of video surveillance points during the expedition trip

№	Название Location	Координаты Coordinates	Глубина, м Depth, m	Тип грунта Bottom type	Высота волны Wave height	Наличие луны The presence of the moon	Дата и время Date and time
Ст. 1 St. 1	Сортавальские шхеры Sortavala skerries	N61°38.295' E30°41.297'	35	Ил Silt	0,3 м	Отсутствует, ясно Missing, clear	24.07.2019 23:30
Ст. 2 St. 2	Напротив входа в зал. Импилахти Opposite the entrance to Impilahti Bay	N61°34.460' E31°11.184'	31	Ил Silt	0,2 м	Отсутствует, облачно Missing, cloudy	25.07.2019 23:10
Ст. 3 St. 3	Рядом с о. Мантсин- саари Near Mantsinsaari Island	N61°19.958' E31°40.729'	6,8	Валуны Boulders	0,2 м	Растущая, ясно Growing, clear	26.07.2019 23:47
Ст. 4 St. 4	Свирская губа Svir Bay	N60°37.552' E32°54.919'	6,5	Песок Sand	0,2 м	Растущая, ясно Growing, clear	28.07.2019 00:29
Ст. 5 St. 5	Якимварский залив Yakimvar Bay	N61°29.398' E30°15.333'	25	Ил Silt	0,2 м	Отсутствует, ясно Missing, clear	30.07.2019 00:29
Ст. 6 St. 6	Залив Рауталаhti Rautalahti Bay	N61°44.426' E30°42.127'	14	Ил Silt	0,3 м	Отсутствует, облачно Missing, cloudy	30.07.2019 23:49
Ст. 7 St. 7	Напротив г. Приозерска Opposite the city of Priozersk	N61°02.952' E30°12.522'	13	Песок Sand	0,3 м	Отсутствует, облачно Missing, cloudy	01.08.2019 23:44
Ст. 8 St. 8	Бухта Далекая Dalekaya Bay	N60°34.304' E30°41.802'	7	Песок, валуны Sand, Boulders	1,3 м	Отсутствует, облачно Missing, cloudy	02.08.2019 23:50

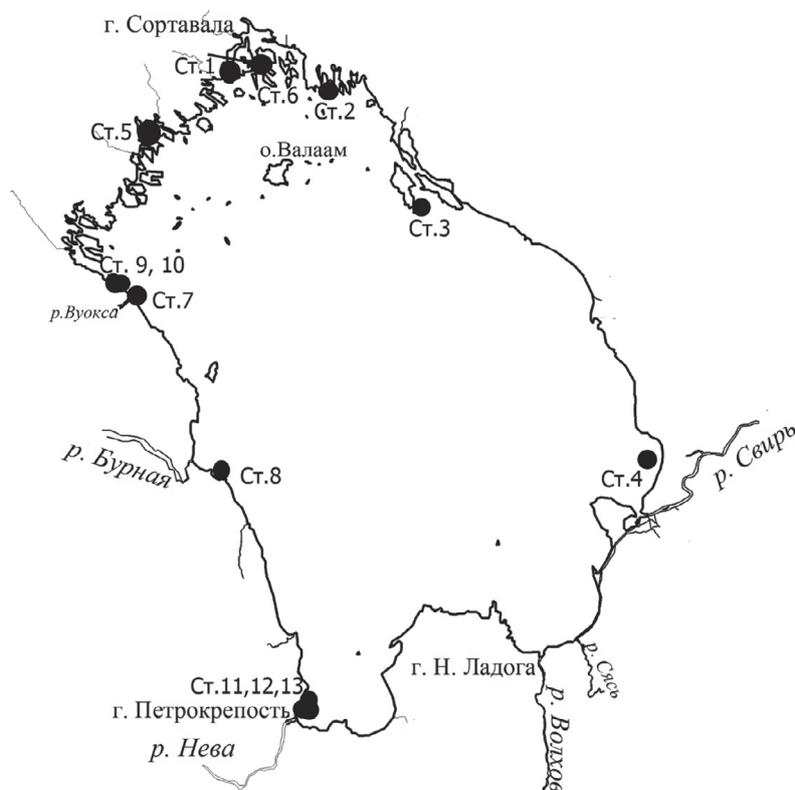


Рис. 1. Местоположение станций проведения видеонаблюдений в Ладожском озере

Fig. 1. Location of video surveillance stations in Lake Ladoga

Таблица 2. Гидрохимические и гидрофизические показатели в точках проведения видеонаблюдений в Ладожском озере во время экспедиционного рейса (июль–август 2019 г.)

Table 2. Hydrochemical and hydrophysical characteristics at the video observation points in Lake Ladoga during an expedition (July–August 2019)

№	Местообитание Locations	pH	O ₂ , мг/л O ₂ , mg/l	O ₂ , % насыщения O ₂ , % saturation	Мутность, NTU Turbidity, NTU	Окислительно- восстанови- тельный по- тенциал, мВ Redox potential, mV	Минерали- зация, г/л Total dissolved solids, g/l	Температура воды у по- верхности, °C Water tempera-ture at the surface, °C
1	Ст. 1 St. 1	7,6	9,23	101,02	1,57	311	0,048	19,4
2	Ст. 2 St. 2	7,9	9,31	104,97	2,55	224	0,055	20,0
3	Ст. 3 St. 3	8,1	9,47	100,56	1,78	270	0,048	21,3
4	Ст. 4 St. 4	7,7	11,04	97,03	2,76	237	0,059	19,2
5	Ст. 5 St. 5	8,0	9,53	101,71	2,33	285	0,059	18,5
6	Ст. 6 St. 6	7,3	10,92	94,07	0,65	264	0,05	10,9
7	Ст. 7 St. 7	7,4	11,46	97,05	1,35	302	0,049	15,8
8	Ст. 8 St. 8	7,4	9,09	96,00	1,59	255	0,051	15,4

Примечание. Здесь и в табл. 3 и 4: местоположение станций – см. табл. 1 и рис. 1.

Note. Here and in Tab. 3 and 4: the location of the stations is given in Tab. 1 and in Fig. 1.

Различия оцененных гидрохимических и гидрофизических параметров в исследованных точках были незначительны (табл. 2), за исключением показателей мутности и температуры в заливе Рауталаhti в результате ветрового гона поверхностных вод.

В качестве основного метода нами использовалось дистанционное видеонаблюдение, которое заключалось в спуске видеосистемы, состоящей из металлического каркаса, видеокамеры GoPro 4, трех осветительных элементов и термологгера iButton. Методика обработки полученных видеозаписей (видеозапись в среднем ведется 15 минут), ранее неоднократно подробно описанная [Тахтеев и др., 2014; Karnaukhov et al., 2016; Takhteev et al., 2019], заключается в остановке видео через каждые 5 сек и подсчете на экране организмов-мигрантов. В результате обработки видео по этой методике получается такая единица измерения, как количество экз./стоп-кадр.

В дополнение к основному методу нами использовались планктонная сеть Джеди и дночерпатели Экмана – Берджа и Петерсена. В пробах, отобранных при помощи дночерпателей (в том случае, если это было возможно), определяли видовой состав и плотность поселения амфипод на дне в месте ночного видео-

наблюдения, а с помощью планктонной сети устанавливали количество мигрантов, находящихся непосредственно в водной толще.

Для оценки в ходе исследований физико-химических характеристик водной среды применялся автоматический многопараметрический зонд Aqua TROLL 500 (производство In-Situ Inc.).

Первичная обработка результатов и построение графиков проведены с помощью Microsoft Excel, а статистическое сравнение полученных данных – в программе Past 3.x.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных видеонаблюдений и отборов проб с помощью сети Джеди показали, что групповое разнообразие ночного миграционного комплекса в Ладожском озере может быть достаточно высоко (табл. 3). Так, на точке проведения видеонаблюдения напротив г. Приозерска отмечены представители сразу пяти групп гидробионтов (рис. 2).

Однако в количественном плане миграционный комплекс как относительно представителей всех групп, так и относительно амфипод является достаточно бедным. Наибольшая активность амфипод зафиксирована нами так-

Таблица 3. Наличие различных групп гидробионтов при проведении видеонаблюдений и обловов пелагиали в различных точках Ладожского озера

Table 3. The presence of different groups of hydrobionts during video surveillance and pelagial sampling at various points of Lake Ladoga

№	Место исследований / Станция Locations / Station	Амфиподы Amphipods	Рыбы Fish	Водные клопы Water bugs	<i>Leptodora kindtii</i>	Мизиды Mysids	Хирономи- ды Chiro- nomids
1	Щучий залив (глубина 0,5 м; апрель 2019) / Ст. 9 Shuchiy Bay (depth 0,5 m; April 2019) / St. 9	-	-	+	-	-	-
2	Щучий залив (глубина 1 м; апрель 2019) / Ст. 10 Shuchiy Bay (depth 1 m; April 2019) / St. 10	-	-	+	-	-	-
3	Пляж у пос. Морозова (глубина 1 м; апрель 2019) / Ст. 11 Beach at the village Morozova (depth 1 m; April 2019) / St. 11	+	-	+	-	-	-
4	Пляж у пос. Морозова (глубина 0,5 м; апрель 2019) / Ст. 12 Beach at the village Morozova (depth 0,5 m; April 2019) / St. 12	+	+	+	-	-	-
5	Ст. 1 St. 1	-	+	-	-	+	-
6	Ст. 2 St. 2	+	-	-	+	-	+
7	Ст. 3 St. 3	+	-	-	+	-	-
8	Ст. 4 St. 4	+	-	-	+	-	-
9	Ст. 5 St. 5	-	+	-	-	-	-
10	Ст. 6 St. 6	+	-	-	-	+	-
11	Ст. 7 St. 7	+	+	-	+	+	+
12	Ст. 8 St. 8	-	+	-	+	-	-
13	Ст. 11 (август 2019) St. 11 (August 2019)	+	+	-	-	-	-
14	Ст. 12 (август 2019) St. 12 (August 2019)	+	+	-	-	-	-
15	Пляж у пос. Морозова (глубина 0,7 м; август 2019) / Ст. 13 Beach at the village Morozova (depth 0,7 m; August 2019) / St. 13	+	+	-	-	-	-

же на точке у г. Приозерска и в среднем за все время видеонаблюдения составила 0,1 экз./стоп-кадр (табл. 4). В то же время в оз. Байкал, например, численность амфипод в ночном миграционном комплексе может достигать нескольких сотен экз./стоп-кадр [Батрагин и др., 2019].

Во время экспедиционного рейса по открытой акватории озера выловить амфипод с помощью сети Джеди удалось только на точке у входа в зал. Импилахти (табл. 4). Выловленные амфиподы оказались представителями вида *G. fasciatus*, также данные амфиподы выловлены сетью и на точках у пляжа

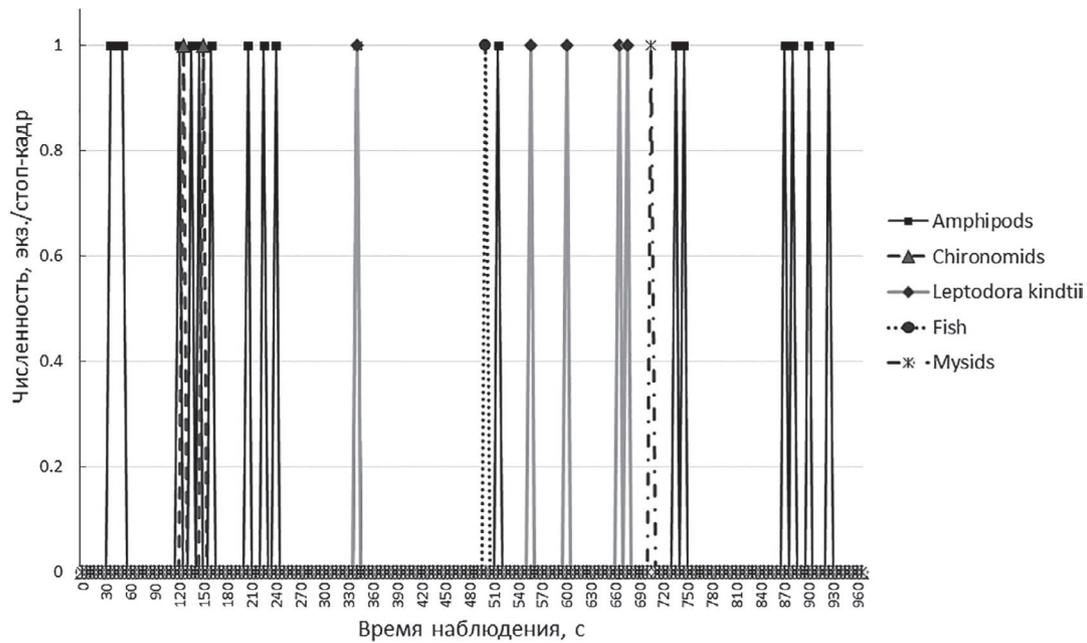


Рис. 2. Динамика численности ночного миграционного комплекса при видеонаблюдении в местообитании у г. Приозерска

Fig. 2. The dynamics of the number of night migration complex during video surveillance in the habitat near Priozersk

рядом с пос. Морозова (на точке с глубиной 1 м – 16 экз./м³, на точке с глубиной 0,5 м – 33 экз./м³) при полевых выездах в августе. Стоит отметить, что на данных точках зафиксировано также и большое количество амфипод (состоящее из представителей двух видов: *G. fasciatus* и *M. possolskii*) в донном сообществе. На точке с глубиной 1 м численность *M. possolskii* оказалась равна 1240 экз./м², а *G. fasciatus* – 2360 экз./м². В свою очередь на точ-

ке с глубиной 0,5 м: *G. fasciatus* – 80 экз./м², а *M. possolskii* – 1560 экз./м².

Несмотря на значительную численность по сравнению с численностью на точках в рамках экспедиционного рейса, сравнение миграционной активности по результатам видеонаблюдений на точках с различными глубинами с помощью критерия Краскела – Уоллиса ($p = 0,3482$) показало отсутствие существенных различий в медианах выборок (рис. 3). Таким

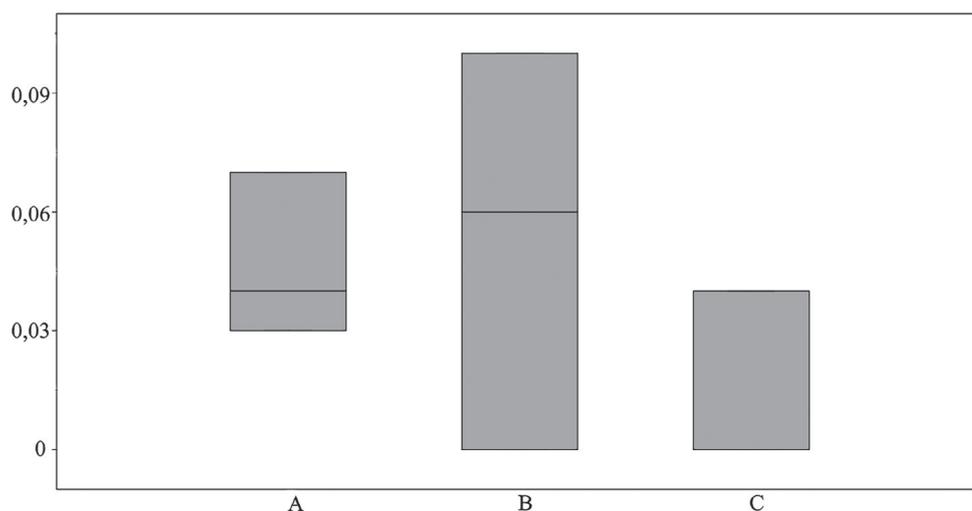


Рис. 3. Колебания численности амфипод (по вертикали – экз./стоп-кадр) на точках с различными глубинами: А – 0,5–1 м; В – 6–7 м; С – 25–35 м

Fig. 3. Fluctuations in the number of amphipods (vertical – ind. / freeze frame) at points with different depths: А – 0,5–1 м; В – 6–7 м; С – 25–35 м

Таблица 4. Численность амфипод на исследованных точках во время экспедиционного рейса

Table 4. The number of amphipods at the studied points during the expedition voyage

№	Название Locations	Численность на дне, экз./м ² Abundance at the bottom, ind./m ²	Численность в толще воды Abundance in the water column		Численность, экз./стоп-кадр у грунта Abundance, ind. / freeze frame at the bottom	Численность, экз./стоп-кадр у поверхности Abundance, ind. / Freeze frame at the surface	Комментарии Comments
			экз./м ³ ind./m ³	экз./м ³ ind./m ²			
1	Ст. 1 St. 1	0	0	0	0	0	При спуске и подъеме отмечены единичные особи мизид и рыб During descent and ascent, single individuals of mysids and fish were noted
2	Ст. 2 St. 2	40	0,54	16,6	0,04	0	-
3	Ст. 3 St. 3	Не удалось отобрать пробы Failed to take samples	0	0	0,06	0	2 особи амфипод были видны у фонарей видеосистемы при съемке у поверхности 2 individuals of amphipods were visible at the video system lights when shooting near the surface
4	Ст. 4 St. 4	40	0	0	0,06	0	-
5	Ст. 5 St. 5	120	0	0	0	0	В поле зрения камеры было только 2 рыбы 2 fish were noted in the camera's field of view
6	Ст. 6 St. 6	40	0	0	0,08	0	-
7	Ст. 7 St. 7	Не удалось отобрать пробы Failed to take samples	0	0	0,1	0	-
8	Ст. 8 St. 8	0	0	0	0	0	-

образом, можно говорить, что миграционная активность амфипод в Ладожском озере не зависит от глубины, а учитывая тот факт, что сетью были отловлены исключительно представители байкальских вселенцев, то возможно, что у ладожских видов амфипод и вселенцев понто-каспийского комплекса суточная вертикальная активность выражена еще слабее либо полностью отсутствует.

Сравнение полученных видеоданных с результатами количественных дночерпательных сборов показывает, что в условиях Ладожского озера видеонаблюдения в придонном слое воды не могут заменить дночерпательные про-

бы по учету численности и биомассы амфипод в силу низкой миграционной активности амфипод, когда большая часть популяций *G. fasciatus* и *M. possolskii* находится в донном биотопе, а не участвует в НВМ.

Зависимости суточной вертикальной активности амфипод (табл. 4) от гидрохимических и гидрофизических показателей (табл. 2) в результате проведенного исследования не обнаружено.

Заключение

Явление СВМ амфипод в Ладожском озере присутствует, однако активность его заметно

ниже, чем в ряде других водоемов [Лабай, Лабай, 2014; Батранин и др., 2019]. Достоверных различий в интенсивности миграций в диапазоне глубин 0,5–35 м не выявлено. В миграциях участвуют байкальские амфиподы-вселенцы *G. fasciatus* и *M. possolskii*. Участвия в миграциях других видов амфипод Ладожского озера зафиксировать не удалось. Однако результаты данного исследования следует считать только предварительными. Необходимы более подробные исследования в открытых озерных районах, местах массового обитания таких видов, как *M. affinis*, *P. quadrispinosa*, *G. (R.) lacustris*, миграционная активность которых осталась до конца не выясненной в рамках проведенной работы. При этом важен также сезонный аспект в изучении миграций амфипод в Ладожском озере, обусловленный, например, изменением светового дня и температуры, так же как и для других беспозвоночных [Николаев, 1975].

Исследование выполнено при поддержке РФФИ по научному проекту № 19-34-50007, а также в рамках выполнения работ по теме № 0154-2019-0001 ИНОЗ РАН.

Авторы выражают благодарность Д. С. Бардинскому и команде НИС «Посейдон» за помощь в проведении полевых работ.

Литература

- Барбашова М. А., Малявин С. А., Курашов Е. А. Находка байкальской амфиподы *Micrurorus possolskii* Sowinsky, 1915 (AMPHIPODA, CRUSTACEA) в Ладожском озере // Российский журнал биологических инвазий. 2013. Т. 6, № 3. С. 16–23.
- Батранин Д. А., Тахтеев В. В., Еропова И. О., Говорухина Е. Б. Структура ночного миграционного комплекса гидробионтов в различных районах оз. Байкал летом 2017 г. и проблема изменения трофического статуса озера // Известия Иркутского гос. университета. Сер. Биология. Экология. 2019. Т. 27. С. 62–86.
- Грезе И. И. О суточных вертикальных миграциях некоторых бокоплавов в Черном и Азовском морях. Бентос. Киев: Наукова думка, 1965. С. 9–14.
- Долинская Е. М., Бирицкая С. А., Карнаухова Д. Ю., Зилов Е. А. Обнаружение в составе ночного миграционного комплекса представителя отряда Isopoda (Crustacea) в районе бухты Большие Коты (Южный Байкал) // Байкальский зоологический журнал. 2018. № 2(23). С. 107–108.
- Кожова О. М. Введение в гидробиологию. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. 244 с.
- Курашов Е. А., Барбашова М. А., Барков Д. В., Русанов А. Г., Лаврова М. С. Инвазивные амфиподы как фактор трансформации экосистемы Ладожского озера // Российский журнал биологических инвазий. 2012. Т. 5, № 2. С. 87–104.
- Лабай В. С., Лабай С. В. Суточные вертикальные миграции высших ракообразных (Crustacea: Malacostraca) в лагунном озере Птичье (Южный Сахалин) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. Вып. 6. С. 369–379.
- Николаев И. И. Сезонные изменения в сообществах беспозвоночных литоральной и лимнической зон Онежского озера в связи с горизонтальными миграциями массовых популяций. Литоральная зона Онежского озера. Л.: Наука, 1975. С. 211–218.
- Тахтеев В. В., Карнаухова Д. Ю., Мишарин А. С., Говорухина Е. Б. Дистанционные методы экологических исследований и мониторинга в лимнологии и океанологии и их применение на озере Байкал // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2014. Вып. 3. С. 374–381.
- Blinn D. W., Grossnickle N. E., Dehdashti B. Diel vertical migration of a pelagic amphipod in the absence of fish predation // Hydrobiol. 1988. Vol. 160. P. 165–171.
- Elder L. E., Seibel B. A. The thermal stress response to diel vertical migration in the hyperiid amphipod *Phronima sedentaria* // Comp. Biochem. Physiol. Part A. 2015. No. 187. P. 20–26. doi: 10.1016/j.cbpa.2015.04.008
- Euclide P. T., Hansson S., Stockwell J. D. Partial diel vertical migration in an omnivorous macroinvertebrate, *Mysis diluviana* // Hydrobiol. 2017. Vol. 787. P. 387–396.
- Evstigneeva T., Clark P. F., Boxshall G. A. Nocturnal emergence behavior of the fauna of lake Baikal, Siberia // Prog. Underwater Sci. 1991. No. 16. P. 85–91.
- Fernandez-Gonzalez V., Fernandez-Jover D., Toledo-Guedes K., Valero-Rodriguez J. M., Sanchez-Jerez P. Nocturnal planktonic assemblages of amphipods vary due to the presence of coastal aquaculture cages // Mar. Environ. Res. 2014. Vol. 101. P. 22–28. doi: 10.1016/j.marenvres.2014.08.001
- Fincham A. A. Amphipods in the surf plankton // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 1970. Vol. 50. P. 177–198.
- Gauthier S., Rose G. A. Acoustic observation of diel vertical migration and shoaling behaviour in Atlantic redfishes // J. Fish Biol. 2002. No. 61. P. 1135–1153. doi: 10.1111/j.1095-8649.2002.tb02461.x
- Hays G. C., Kennedy H., Frost B. W. Individual variability in diel vertical migration of a marine copepod: Why some individuals remain at depth when others migrate // Limnol. Oceanogr. 2001. Vol. 46, no. 8. P. 2050–2054. doi: 10.4319/lo.2001.46.8.2050
- Iguchi N., Ikeda T. Vertical distribution, population structure and life history of *Thysanoessa longipes* (Crustacea: Euphausiacea) around Yamato Rise, central Japan Sea // J. Plankton Res. 2004. No. 26. P. 1015–1023. doi: 10.1093/plankt/fbh092
- Karnaukhov D. Yu., Bedulina D. S., Kaus A., Prokov S. O., Sartoris L., Timofeyev M. A., Takhteev V. V. Behaviour of Lake Baikal amphipods as a part of the night migratory complex in the Kluevka settlement region (South-Eastern Baikal) // Crustaceana. 2016. Vol. 89, no. 4. P. 419–430. doi: 10.1163/15685403-00003530
- Kringel K., Jumars P. A., Holliday D. V. A shallow scattering layer: High-resolution acoustic analysis of nocturnal vertical migration from the seabed // Limnol., Oceanogr. 2003. Vol. 48, no. 3. P. 1223–1234. doi: 10.4319/lo.2003.48.3.1223

Nishihama S., Hirakawa K. Diel vertical migration of chaetognaths in the Tsushima Current area of the Japan Sea // Bulletin of the Japan Sea. 1998. No. 48. P. 71–83.

Takhteev V. V., Berezina N. A., Sidorov D. A. Checklist of the Amphipoda (Crustacea) from continental waters of Russia, with data on alien species // Arthropoda Selecta. 2015. Vol. 24, no. 3. P. 335–370. doi: 10.15298/arthscl.24.3.09

References

Barbashova M. A., Malyavin S. A., Kurashov E. A. Nakhodka baikal'skoi amfipody *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 (AMPHIPODA, CRUSTACEA) v Ladozhskom ozere [Finding the Baikal amphipod *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 (AMPHIPODA, CRUSTACEA) in Lake Ladoga]. *Ross. zhurn. biol. invazii* [Russ. J. Biol. Invasions]. 2013. Vol. 6, no. 3. P. 16–23.

Batranin D. A., Takhteev V. V., Eropova I. O., Govorukhina E. B. Struktura nochnogo migratsionnogo kompleksa gidrobiontov v razlichnykh raionakh oz. Baikal letom 2017 g. i problema izmeneniya troficheskogo statusa ozera [The structure of the night migration complex of aquatic organisms in various areas of Lake Baikal in the summer of 2017 and the problem of changing the trophic status of the lake]. *Izv. Irkutskogo gos. univ. Ser. Biol. Ekol.* [The Bull. Irkutsk St. Univ. Ser. Biol. Ecol.]. 2019. Vol. 27. P. 62–86.

Dolinskaya E. M., Biritskaya S. A., Karnaukhov D. Yu., Zilov E. A. Obnaruzhenie v sostave nochnogo migratsionnogo kompleksa predstavatelya otryada Isopoda (Crustacea) v raione bukhty Bol'shie Koty (Yuzhnyi Baykal) [Discovery of the specimen from the order Isopoda (Crustacea) as a part of night migratory complex in the Bolshie Koty Harbour (Southern Baikal)]. *Baikal'skii zool. zhurn.* [Baikal Zool. J.]. 2018. No. 2(23). P. 107–108.

Greze I. I. O sutochnykh vertikal'nykh migratsiyakh nekotorykh bokoplavov v Chernom i Azovskom moryakh. Benthos [On daily vertical migrations of some amphipods in the Black and Azov Seas. Benthos]. Kyev: Naukova dumka, 1965. P. 9–14.

Kozhova O. M. Vvedenie v gidrobiologiyu [Introduction to hydrobiology]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Univ. Publ., 1987. 244 p.

Kurashov E. A., Barbashova M. A., Barkov D. V., Rusanov A. G., Lavrova M. S. Invazivnye amfipody kak faktor transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera [Invasive amphipods as a factor in the transformation of the Lake Ladoga ecosystem]. *Ross. zhurn. biol. invazii* [Russ. J. Biol. Invasions]. 2012. Vol. 5, no. 2. P. 87–104.

Labai V. S., Labai S. V. Sutochnye vertikal'nye migratsii vysshikh rakoobraznykh (Crustacea: Malacostraca) v lagunnom ozere Ptich'e (Yuzhnyi Sakhalin) [Daily vertical migrations of higher crustaceans (Crustacea: Malacostraca) in lagoon Lake Ptichye (South Sakhalin)]. *Chteniya pam. Vladimira Yakovlevicha Levanidova* [Readings in memory of Vladimir Yakovlevich Levanidov]. 2014. No. 6. P. 369–379.

Nikolaev I. I. Sezonnnye izmeneniya v soobshchestvakh bespozvonochnykh litoral'noi i limnicheskoi zon Onezhskogo ozera v svyazi s gorizontal'nymi migratsiyami massovykh populatsiy [Seasonal changes in the in-

Takhteev V. V., Karnaukhov D. Yu., Govorukhina E. B., Misharin A. S. Diel vertical migrations of hydrobionts in the coastal area of Lake Baikal // Inland Water Biol. 2019. No. 2. P. 50–61. doi: 10.1134/S1995082919020147

Поступила в редакцию 12.10.2019

vertebrate communities of the littoral and limnic zones of Lake Onega due to horizontal migrations of mass populations]. *Litoral'naya zona Onezhskogo ozera* [Littoral zone of Lake Onega]. Leningrad: Nauka, 1975. P. 211–218.

Takhteev V. V., Karnaukhov D. Yu., Misharin A. S., Govorukhina E. B. Distanttsionnye metody ekologicheskikh issledovaniy i monitoringa v limnologii i okeanologii i ikh primeneniye na ozere Baikal [Remote sensing methods of environmental research and monitoring in limnology and oceanology and their application on Lake Baikal]. *Razvitie zhizni v protsesse abioticheskikh izmenenii na Zemle* [The development of life in the process of abiotic changes on the Earth]. 2014. No. 3. P. 374–381.

Blinn D. W., Grossnickle N. E., Dehdashti B. Diel vertical migration of a pelagic amphipod in the absence of fish predation. *Hydrobiol.* 1988. Vol. 160. P. 165–171.

Elder L. E., Seibel B. A. The thermal stress response to diel vertical migration in the hyperiid amphipod *Phronima sedentaria*. *Comp. Biochem. Physiol. Part A.* 2015. No. 187. P. 20–26. doi: 10.1016/j.cbpa.2015.04.008

Euclide P. T., Hansson S., Stockwell J. D. Partial diel vertical migration in an omnivorous macroinvertebrate, *Mysis diluviana*. *Hydrobiol.* 2017. Vol. 787. P. 387–396.

Evstigneeva T., Clark P. F., Boxshall G. A. Nocturnal emergence behavior of the fauna of lake Baikal, Siberia. *Prog. Underwater Sci.* 1991. No. 16. P. 85–91.

Fernandez-Gonzalez V., Fernandez-Jover D., Toledo-Guedes K., Valero-Rodriguez J. M., Sanchez-Jerez P. Nocturnal planktonic assemblages of amphipods vary due to the presence of coastal aquaculture cages. *Mar. Environ. Res.* 2014. Vol. 101. P. 22–28. doi: 10.1016/j.marenvres.2014.08.001

Fincham A. A. Amphipods in the surf plankton. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 1970. Vol. 50. P. 177–198.

Gauthier S., Rose G. A. Acoustic observation of diel vertical migration and shoaling behaviour in Atlantic redfishes. *J. Fish Biol.* 2002. No. 61. P. 1135–1153. doi: 10.1111/j.1095-8649.2002.tb02461.x

Hays G. C., Kennedy H., Frost B. W. Individual variability in diel vertical migration of a marine copepod: Why some individuals remain at depth when others migrate. *Limnol. Oceanogr.* 2001. Vol. 46, no. 8. P. 2050–2054. doi: 10.4319/lo.2001.46.8.2050

Iguchi N., Ikeda T. Vertical distribution, population structure and life history of *Thysanoessa longipes* (Crustacea: Euphausiacea) around Yamato Rise, central Japan Sea. *J. Plankton Res.* 2004. No. 26. P. 1015–1023. doi: 10.1093/plankt/fbh092

Karnaukhov D. Yu., Bedulina D. S., Kaus A., Proksov S. O., Sartoris L., Timofeyev M. A., Takhteev V. V. Behaviour of Lake Baikal amphipods as a part of the night

migratory complex in the Kluevka settlement region (South-Eastern Baikal). *Crustaceana*. 2016. Vol. 89, no. 4. P. 419–430. doi: 10.1163/15685403-00003530

Kringel K., Jumars P. A., Holliday D. V. A shallow scattering layer: High-resolution acoustic analysis of nocturnal vertical migration from the seabed. *Limnol., Oceanogr.* 2003. Vol. 48, no. 3. P. 1223–1234. doi: 10.4319/llo.2003.48.3.1223

Nishihama S., Hirakawa K. Diel vertical migration of chaetognaths in the Tsushima Current area of the Japan Sea. *Bulletin of the Japan Sea*. 1998. No. 48. P. 71–83.

Takhteev V. V., Berezina N. A., Sidorov D. A. Checklist of the Amphipoda (Crustacea) from continental waters of Russia, with data on alien species. *Arthropoda Selecta*. 2015. Vol. 24, no. 3. P. 335–370. doi: 10.15298/arthsel.24.3.09

Takhteev V. V., Karnaukhov D. Yu., Govorukhina E. B., Misharin A. S. Diel vertical migrations of hydrobionts in the coastal area of Lake Baikal. *Inland Water Biol.* 2019. No. 2. P. 50–61. doi: 10.1134/S1995082919020147

Received October 12, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Карнаухов Дмитрий Юрьевич

аспирант, младший научный сотрудник
НИИ биологии Иркутского государственного университета
ул. Ленина, 3, Иркутск, Россия, 664003
эл. почта: karnauhovdmitrii@gmail.com

Курашов Евгений Александрович

заведующий лаб. гидробиологии, д. б. н., проф.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
главный научный сотрудник
Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053
эл. почта: evgeny_kurashov@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Karnaukhov, Dmitry

Research Institute of Biology, Irkutsk State University
3 Lenin St., 664003 Irkutsk, Russia
e-mail: karnauhovdmitrii@gmail.com

Kurashov, Evgeny

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO (GosNIORKh named after L. S. Berg)
26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia
e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 502.51

ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ВНЕШНЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

**Ш. Р. Поздняков¹, Р. Р. Шагидуллин², С. А. Кондратьев¹,
А. Ю. Брюханов³, М. В. Шмакова¹, Н. С. Обломкова³, А. Т. Горшкова²,
Д. В. Иванов², Ю. В. Горбунова², О. Н. Урбанова², Н. В. Бортникова²**

¹ Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, Казань, Россия

³ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты инвентаризации источников антропогенной нагрузки в бассейнах четырех притоков Куйбышевского водохранилища – рек Казанка, Мёша, Свияга и Большой Черемшан. Реки отличаются физико-географическими условиями формирования стока и разной степенью хозяйственного использования водосборов. Мониторинг количественных и качественных характеристик речного стока осуществляют региональные отделения Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Инвентаризация источников внешней нагрузки включала сбор и систематизацию информации о хозяйственной деятельности в пределах водосбора Куйбышевского водохранилища (888 предприятий). Анализ собранного материала показал, что на территориях исследуемых бассейнов привнесение биогенных веществ с водосбора в составе минеральных и органических удобрений находится на достаточно низком уровне. Нагрузка на водные объекты от точечных источников, оцениваемая через расход сточных вод и концентрацию в них загрязняющих веществ, также невелика. Системы ливневой канализации, произвольный неконтролируемый слив из отстойников, смыв с территорий свалок, неканализованных населенных пунктов, а также отсутствие информации о качестве и количестве данной категории сточных вод требует перевода их в категорию рассеянного загрязнения. Собрана информация об источниках рассеянного загрязнения как по площадным (урбанизированные и сельскохозяйственные пространства, территории свалок и полигонов твердых бытовых отходов, автозаправочных станций, промышленных площадок и др.), так и по линейным (автомагистрали различных категорий) объектам.

Ключевые слова: загрязнение; внешняя нагрузка; точечные и рассеянные источники; водоем; Куйбышевское водохранилище.

Sh. R. Pozdnyakov, R. R. Shagidullin, S. A. Kondratyev, A. Yu. Bryukhanov, M. V. Shmakova, N. S. Oblomkova, A. T. Gorshkova, D. V. Ivanov, Yu. V. Gorbunova, O. N. Urbanova, N. V. Bortnikova. INVENTORY OF THE SOURCES OF EXTERNAL MAN-MADE LOAD ON KUIBYSHEVSKOE STORAGE RESERVOIR

The article presents the results of an inventory of man-made load sources in the drainage basins of Kuibyshevskoe reservoir's four inflowing rivers – Kazanka, Myosha, Sviyaga, Bolshoy Cheremshan, which differ in the physiogeographic conditions for runoff formation and the intensity of land use in the catchments. The quality and quantities of channelized runoff are monitored by regional departments of the Russian Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service. The inventory of external load sources included collection and systematization of information on economic activities within the drainage area of Kuibyshevskoe storage reservoir (888 enterprises). Analysis of the collected material showed that the input of nutrients from the catchment with mineral and organic fertilizers was quite low in the studied basins. The load from point sources estimated from wastewater discharges and pollutant concentrations in them was also low. Stormwater sewerage, random uncontrolled discharges from sedimentation pools, leakage from landfills, non-canalized settlements, as well as the lack of information about the quality and quantity of wastewaters of this category requires that they are classified as non-point pollution. Information has been gathered on non-point pollution sources of both distributed (urbanized and agricultural spaces, landfills, gas stations, industrial sites, etc.) and linear (highways of various categories) types.

Key words: pollution; external load; point and non-point sources; Kuibyshevskoe storage reservoir.

Введение

Недостаточная изученность источников загрязнения Волги и водных объектов ее водосборного бассейна, а также отсутствие научно обоснованных методов оценки и прогноза поступления загрязняющих веществ в водоемы и водотоки явились причиной того, что в 2018 г. Министерством природных ресурсов и экологии РФ было инициировано выполнение проекта «Разработка Концепции по снижению поступления загрязняющих веществ с естественных ландшафтов, селитебных территорий, земель сельскохозяйственного назначения, промышленных площадок предприятий, предприятий животноводческого комплекса, полигонов захоронений и свалок, объектов транспортной инфраструктуры», направленного на оздоровление Волги. В рамках указанного проекта в настоящее время проводится комплекс экспериментальных и теоретических исследований по оценке негативного воздействия на состояние Волги различных источников загрязнения, расположенных в том числе и в пределах территории Республики Татарстан. Успешная реализация проекта предотвращения точечного и рассеянного загрязнения во многом определяется внедрением в дело производство новейших научно-технических средств с использованием и разработкой интерактивных баз данных, моделирования эколого-эконо-

мических ситуаций, прогноза и экономического планирования, геоинформационных и экспертных систем, географического пространственного анализа в целях предоставления оптимизированной многоплановой информации и оптимизации процесса принятия решений.

Цель настоящей работы – инвентаризация точечных и рассеянных источников загрязнения в бассейнах притоков Куйбышевского водохранилища, являющаяся первым шагом на пути создания баз данных и математических моделей для комплексной оценки внешнего антропогенного воздействия на изучаемый объект и отклика его экосистемы на внешние воздействия

Объект исследования

Река Волга стоит первой в списке российских рек с наиболее напряженной экологической ситуацией [Водная..., 2009]. Крупнейшее в Евразии и третье в мире по площади (6,45 км²) Куйбышевское водохранилище [1983], обеспечивающее сезонное регулирование стока Средней Волги, на 50,7 % (3,27 тыс. км²) водного зеркала лежит в пределах границ Республики Татарстан. Общая протяженность береговой линии Куйбышевского водохранилища составляет 2604 км, из них 1392 км находится опять же в пределах Республики Татарстан.

Главное направление организации водохранилища – обеспечение энергетического

комплекса, водоснабжения, водных транспортных, развития рыбохозяйственных и рекреационных отраслей народного хозяйства. Куйбышевское водохранилище проектировалось как объект переменного подпора, характеризующийся непостоянством уровня режима, который регламентируется сводом Правил эксплуатации и использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища. 62 % воды поступает в Куйбышевское водохранилище в период весеннего половодья [Петров, 2004], в летне-осеннюю межень – 26 %, а в зимнюю – 12 %. Смена водной массы в течение года происходит 4–6 раз. Среднегодовой коэффициент условного водообмена составляет 4,3. Площадь бассейна Волги равна 1210 тыс. км², доля основных притоков – рек Кама, Белая и Вятка составляет 1098 тыс. км², то есть 91,5 %. Остальную тер-

риторию занимают бассейны малых и средних рек – 73 реки длиной более 10 км и 260 – менее 10 км. Общий приток поверхностных и подземных вод составляет 99 %, или 240 000 млн м³, поступление осадков – 1 % приходной части водного баланса. Расходная часть водного баланса обусловлена попусками воды Жигулевской ГЭС, может достигать 244 000 млн м³ в год. При этом ГЭС вырабатывает около 10 млрд кВт/час в год. Величина бескомпенсационного забора воды из Волги составляет около 33,7 % и является самой высокой на территории Российской Федерации [Вода..., 2000].

Результаты мониторинга состояния качества вод неутешительны, в течение последних шести лет класс качества воды Куйбышевского водохранилища, как и питающих его рек, удерживается в диапазоне 3б – 4а категории, т. е.



Рис. 1. Схема расположения пилотных водосборов в бассейне Куйбышевского водохранилища

Fig. 1. The location scheme of the pilot catchments at the Kuibyshev Reservoir catchment area

воды котируются как стабильно «сильно загрязненные – грязные» [Источники..., 2018].

Для отработки методов оценки внешнего воздействия на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора выбрано четыре пилотных водосбора стратегически важных рек с большим потенциалом территориального и эксплуатационного развития – это Казанка, Мёша, Большой Черемшан и Свяга (рис. 1). Все указанные реки относятся к категории средних равнинных рек с площадями водосборов от 2000 до 50 000 км². Выбор именно этих рек объясняется следующими причинами:

- водосборы рек расположены в различных физико-географических районах;
- водосборы рек расположены в различных ландшафтных подзонах;
- гидрологические и почвенно-геологические условия на водосборах существенно различаются;
- источники антропогенного воздействия на водосборах также существенно различаются.

Мониторинг количественных и качественных характеристик речного стока на указанных пилотных объектах осуществляют региональные отделения Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Сельскохозяйственные источники нагрузки на водные объекты

Одним из основных источников поступления биогенных элементов в Куйбышевское водохранилище и водные объекты его бассейна, способствующим их эвтрофированию, является сток с территорий, подверженных сельскохозяйственному воздействию. Сельскохозяйственное предприятие как источник негативного воздействия на окружающую среду – сложная система с множеством взаимозависимых показателей (рис. 2). Инвентаризация включала сбор и систематизацию информации о сельскохозяйственной деятельности в пределах водосбора Куйбышевского водохранилища, а именно – расположение

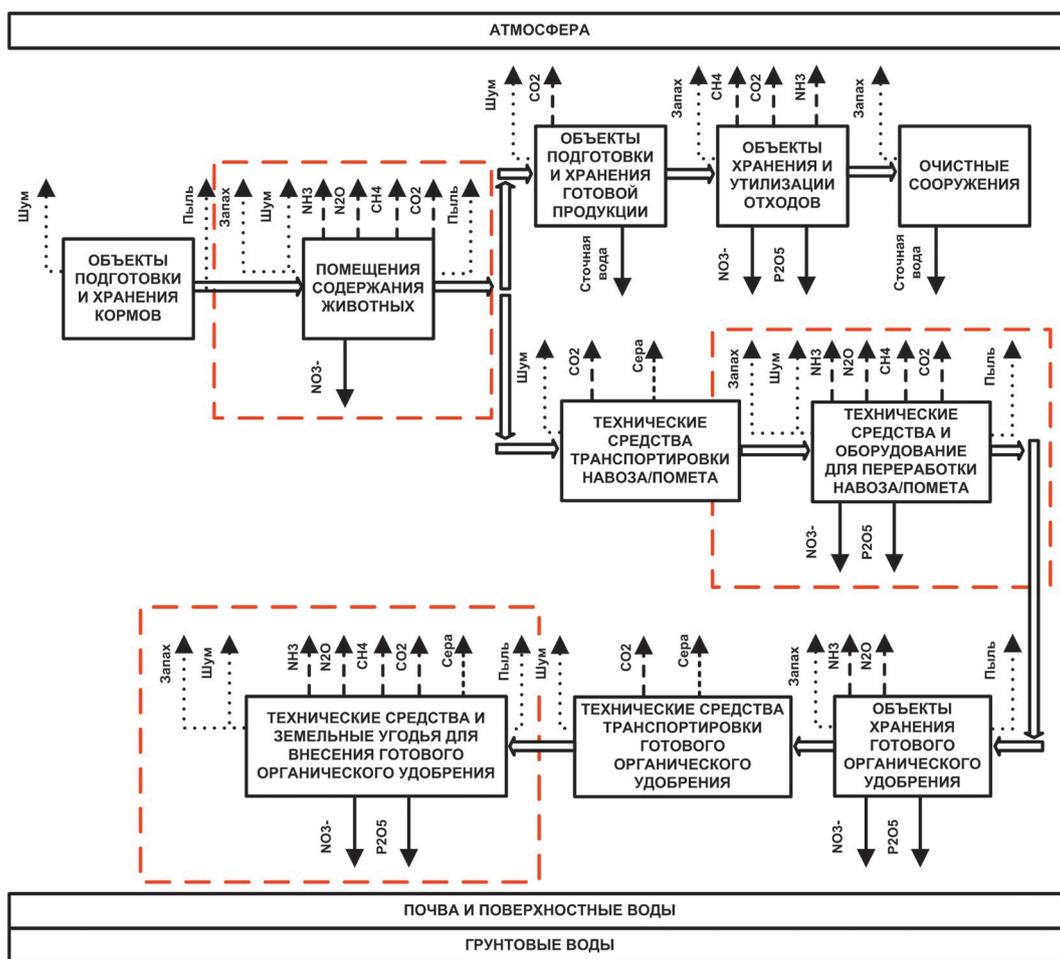


Рис. 2. Основные блоки животноводческого предприятия и их негативное воздействие на окружающую среду

Fig. 2. The main blocks of the livestock enterprise and their negative impact on the environment

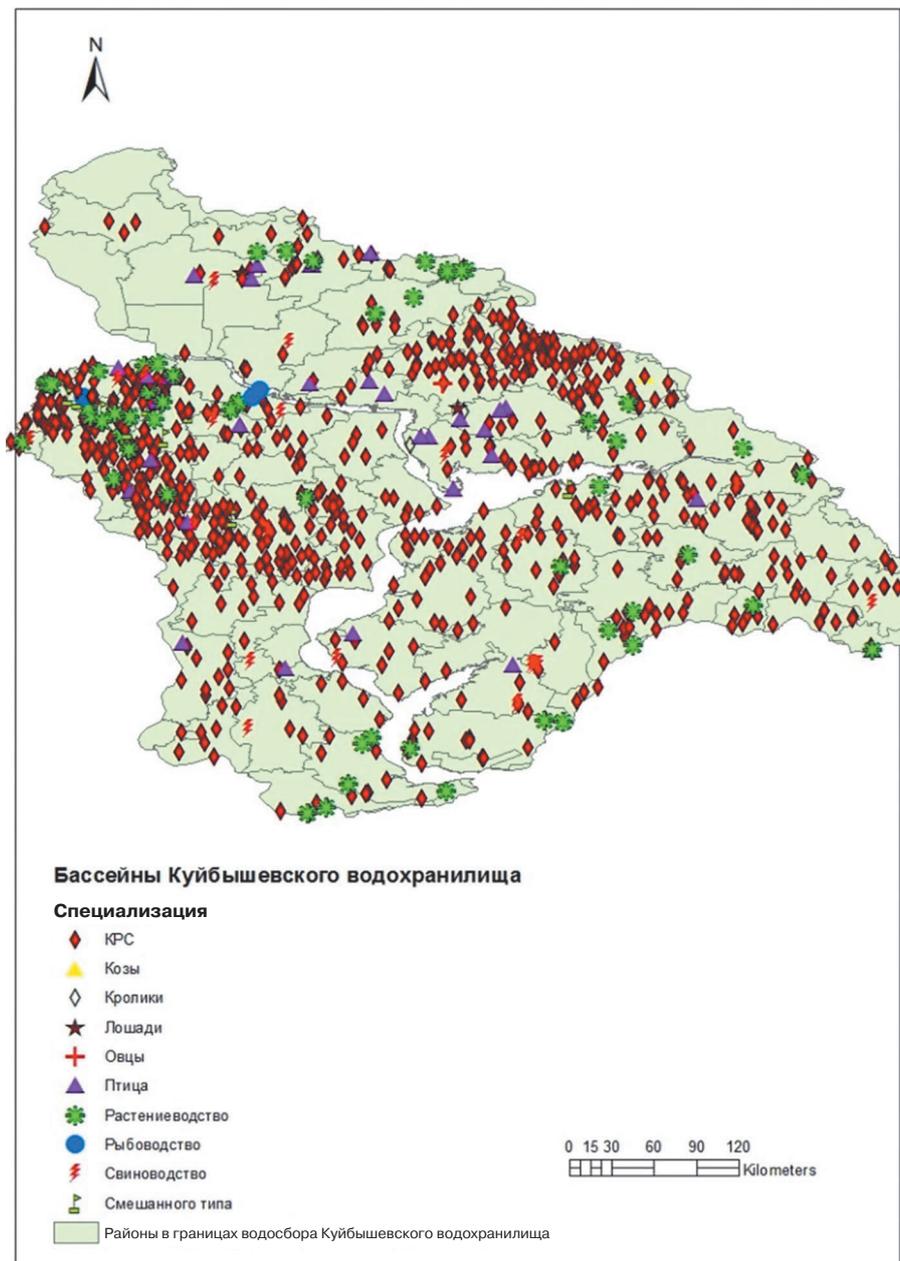


Рис. 3. Схема расположения 888 сельскохозяйственных объектов, включенных в перечень источников диффузного поступления биогенных элементов по итогам выполненной инвентаризации

Fig. 3. The location scheme of 888 agricultural facilities included in the list of sources of diffuse nutrient input according to the inventory results

крупных сельскохозяйственных предприятий, их специализацию, общее количество сельскохозяйственных животных и птицы, дозы внесения органических и минеральных удобрений, типы почв и содержание в них азота и фосфора. На основе проведенной инвентаризации 888 предприятий сформирована база данных, характеризующая сельскохозяйственную деятельность на водосборе Куйбышевского водохранилища¹.

¹ Базы данных ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

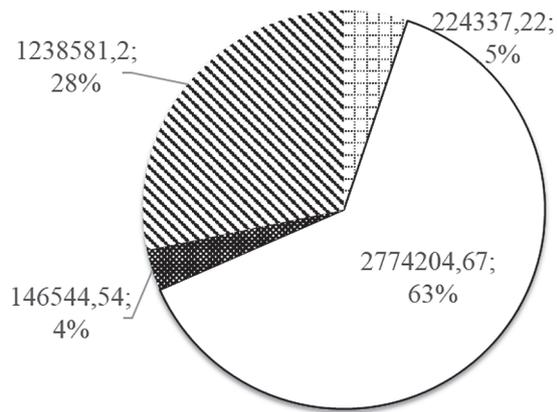
Карта-схема расположения всех объектов представлена на рис. 3.

Приоритетным фактором выноса биогенных элементов является разведение крупного рогатого скота, которое базируется в основном на предприятиях средней величины с поголовьем не более 2000 голов на одной площадке. На рассматриваемой территории находится до 15 площадок с поголовьем от 3000 до 6000 голов и 22 предприятия с поголовьем скота от 2000 до 2999. Предприятия по содержанию

крупного рогатого скота используют выгульные негидроизолированные прифермские площадки, на которых накапливаются остатки кормов и отходы жизнедеятельности животных. Из этих остатков образуются стоки с большими концентрациями биогенных элементов, которые, из-за отсутствия гидроизоляции, поступают в поверхностные и грунтовые воды. Свиноводство и птицеводство в основном представлено крупными обособленными предприятиями с сосредоточением большого поголовья животных и птиц на ограниченных территориях, что повышает риски чрезмерного поступления биогенных элементов на точечных территориях в условиях применения гидросмыва при нарушении технологий хранения навоза и использования его в качестве органического удобрения. При оценке эффективности применения азота и фосфора и анализе факторов, влияющих на поступление этих веществ в водные объекты, основными показателями являлись: структура посевных площадей, поголовье основных видов сельскохозяйственных животных и использование минеральных и органических удобрений. Все площади, задействованные для выращивания сельскохозяйственных культур, подразделены на четыре категории в зависимости от технологий обработки почвы: 1 категория – пропашные, в том числе картофель, капуста, свекла столовая, морковь столовая, корнеплодные кормовые культуры (кормовая свекла, брюква, турнепс и другие) и т. п.; 2 категория – зерновые и зернобобовые культуры, однолетние травы; 3 категория – кормовые культуры, в том числе многолетние, и т. п., за исключением однолетних трав; 4 категория – залежные земли (рис. 4). На основе проведенного анализа можно заключить, что наиболее распространенным видом использования сельскохозяйственных площадей является выращивание зерновых и зернобобовых культур, а также однолетних трав (2 категория земель). В большинстве районов доля этих площадей составляет более 50 %. При этом 25 % от всех посевных площадей на рассматриваемой территории находится в управлении хозяйств населения.

Анализ образования навоза и помета показал, что в водосборе около 81 % образуемого навоза относится к полужидкой фракции крупного рогатого скота, 8 % составляет навоз свиней, 7 % – помет птицы (рис. 5). Доля образуемого навоза и помета от других видов сельскохозяйственных животных не превышает 5 % общего объема.

Результаты инвентаризации по пилотным водосборам представлены в таблице. Исследование собранных материалов выявило, что



1 категория 2 категория 3 категория 4 категория

Рис. 4. Распределение площадей сельхозугодий по категориям в пределах водосбора Куйбышевского водохранилища

Fig. 4. Distribution of farmland areas by category within the catchment area of the Kuibyshev Reservoir

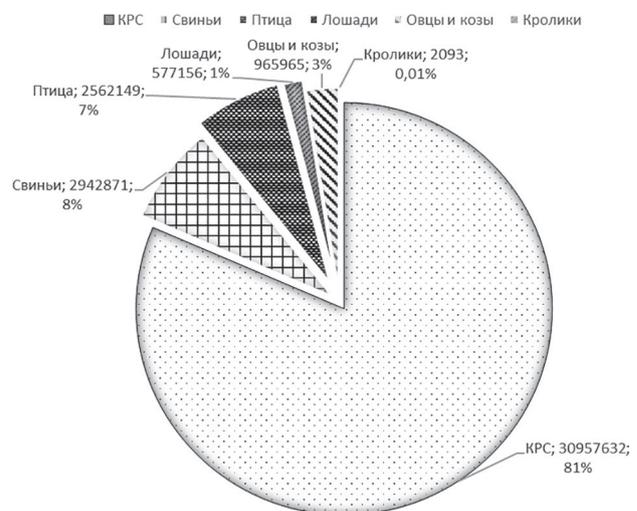


Рис. 5. Образование навоза и помета по видам сельскохозяйственных животных, т/год

Fig. 5. Manure and litter formation by type of farm animals, tons/year

на большей части водосбора Куйбышевского водохранилища привнесение азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений находится на достаточно низком уровне. В 98 % районов доза внесения азота ниже 200 кг/га, фосфора – 30 кг/га. На рассматриваемой территории при условии применения удобрений в соответствии с действующими рекомендациями, с учетом применяемых севооборотов и равномерного распределения азота и фосфора по обрабатываемым сельскохозяйственным угодьям превышение нагрузки по биогенным элементам на почвы маловероятно.

Установлено, что не менее 83 % предприятий по разведению сельскохозяйственных животных имеют навозохранилища и места

Сводные данные, характеризующие сельскохозяйственную деятельность в границах рассматриваемых водосборных бассейнов (перечень объектов по результатам инвентаризации)

Consolidated data characterizing agricultural activities within the boundaries of the catchments under consideration (list of the objects based on inventory results)

Речной бассейн River basin	Количество предприятий Number of enterprises										
	КРС Cattle	Растение- водство Plant growing	Птицевод- ство Poultry	Свиновод- ство Pigs	Овцевод- ство Sheep	Козовод- ство Goats	Коневод- ство Horses	Смешан- ного типа Mixed	Рыбовод- ство Fish farming	Кролико- водство Rabbits	Суммарно Overall
р. Черемшан Cheremshan	67	9	2	5	0	0	0	0	0	0	83
р. Свяяга Sviyaga	199	3	5	4	0	0	0	2	0	0	213
р. Мёша Myosha	40	2	6	1	0	1	0	0	0	1	51
р. Казанка Kazanka	68	0	0	0	1	0	1	0	0	2	72
Другие реки бассейна Куйбышевского водо- хранилища Others	380	45	17	11	0	0	1	9	3	2	468
Поголовье Livestock											
р. Черемшан Cheremshan	41025	-	4040000	149400	-	-	-	-	-	-	-
р. Свяяга Sviyaga	164201	-	1420000	61700	-	-	-	-	-	-	-
р. Мёша Myosha	33100	-	1000	-	-	-	-	-	-	-	-
р. Казанка Kazanka	47510	-	1650000	36000	-	-	1400	-	-	-	-
Другие реки бассейна Куйбышевского водо- хранилища Others	251010	-	20060918	323040	-	-	600	-	-	-	-
Выход навоза, т/год Manure output, t/year											
р. Черемшан Cheremshan	1048189	-	368650	490779	-	-	-	-	-	-	1907618
р. Свяяга Sviyaga	4195336	-	129575	202685	-	-	-	-	-	-	4527596
р. Мёша Myosha	845705	-	91	-	-	-	28009	-	-	-	873805

Окончание табл.

Table (continued)

Речной бассейн River basin	Количество предприятий Number of enterprises										
	КРС Cattle	Растение- водство Plant growing	Птицевод- ство Poultry	Свиновод- ство Pigs	Овцевод- ство Sheep	Козовод- ство Goats	Коневод- ство Horses	Смешан- ного типа Mixed	Рыбовод- ство Fish farming	Кролико- водство Rabbits	Суммарно Overall
р. Казанка Kazanka	1213881	-	150563	118260	-	-	-	35770	-	-	1518473
Другие реки бассейна Куйбышевского водо- хранилища Others	6413306	-	1792200	1061186	-	-	-	15330	-	-	9282022
Общ. азота в составе органических удобрений, т/год Total nitrogen in organic fertilizers, t/year											
р. Черемшан Cheremshan	5031,31	-	3686,5	1177,87	-	-	-	-	-	-	9895,68
р. Свияга Sviyaga	20137,61	-	1295,75	486,45	-	-	-	-	-	-	21919,81
р. Мёша Muosha	4059,42	-	0,91	0	-	-	-	84,03	-	-	4144,36
р. Казанка Kazanka	5826,62	-	1505,63	283,82	-	-	-	171,7	-	-	7787,77
Другие реки бассейна Куйбышевского водо- хранилища Others	30783,83	-	17922,01	2641,47	-	-	-	73,58	-	-	51420,89
Общ. фосфора в составе органических удобрений, т/год Total phosphorus in organic fertilizers, t/year											
р. Черемшан Cheremshan	838,55	-	774,17	343,54	-	-	-	0	-	-	1956,26
р. Свияга Sviyaga	3356,25	-	272,12	141,88	-	-	-	0	-	-	3770,25
р. Мёша Muosha	676,6	-	0,19	0	-	-	-	19,61	-	-	696,4
р. Казанка Kazanka	971,11	-	316,18	82,78	-	-	-	28,62	-	-	1398,69
Другие реки бассейна Куйбышевского водо- хранилища Others	5130,61	-	3763,62	746,78	-	-	-	12,26	-	-	9653,27

складирования органических удобрений, не отвечающие в полной мере требованиям экологического законодательства. Навоз в большинстве случаев складывается на прифермских территориях без необходимой гидроизоляции. Следует учитывать, что многие предприятия находятся в непосредственной близости от водных объектов, и это в совокупности повышает риск негативного воздействия на Куйбышевское водохранилище.

Промышленные и хозяйственно-бытовые источники поступления сточных вод

Бесспорно, сельскохозяйственные и животноводческие предприятия существенно влияют на загрязнение водных объектов. Однако исследования показывают, что в последние годы все больший вклад по биогенной нагрузке приходится на долю промышленных и хозяйст-

венно-бытовых сточных вод неканализованных населенных пунктов [Шагидуллин и др., 2017].

В пределах выбранных изучаемых водосборов проанализирована ситуация формирования качества воды по легитимным данным существующих систем наблюдения различной ведомственной принадлежности, представленным официальными государственными отчетами федерального и регионального уровней, а также по данным научно-исследовательского мониторинга водных ресурсов ИПЭН АН РТ [Урбанова и др., 2016]. Так, по анализу точечных источников загрязнения, отчитывающихся по формам государственной статистической отчетности 2-ТП (водхоз), получена информация о биогенной составляющей сбросов предприятий в водные объекты бассейнов перечисленных рек (рис. 6–9). Нагрузка на водный объект в этом случае оценивается напрямую через такие показатели, как расход поступле-



Рис. 6. Точечная биогенная нагрузка на водосбор реки Казанка.

Здесь и на рис. 7–9: 1 – фосфаты, т/год; 2 – азот аммонийный, т/год

Fig. 6. Local biogenic load on the catchment of the Kazanka River.

Here and in Fig. 7–9: 1 – phosphates, tons/year; 2 – ammonia nitrogen, tons/year

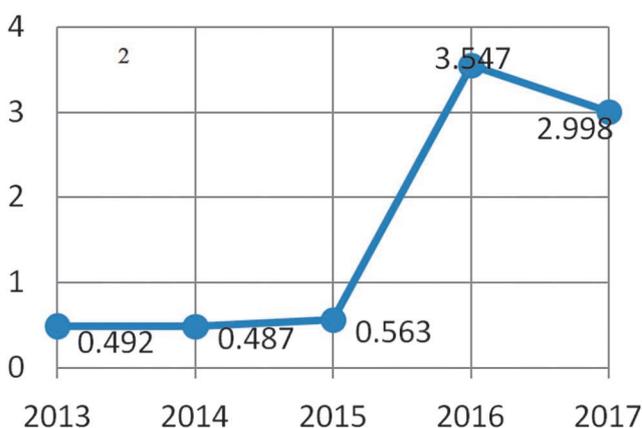
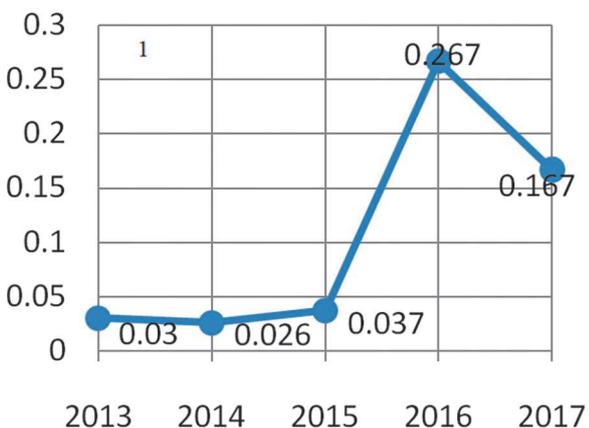


Рис. 7. Точечная биогенная нагрузка на водосбор реки Мёша

Fig. 7. Local biogenic load on the catchment of the Myosha River

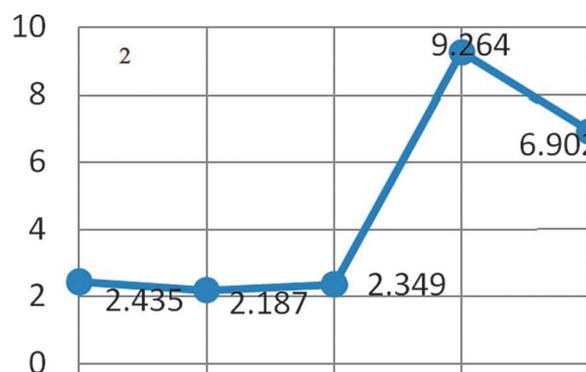
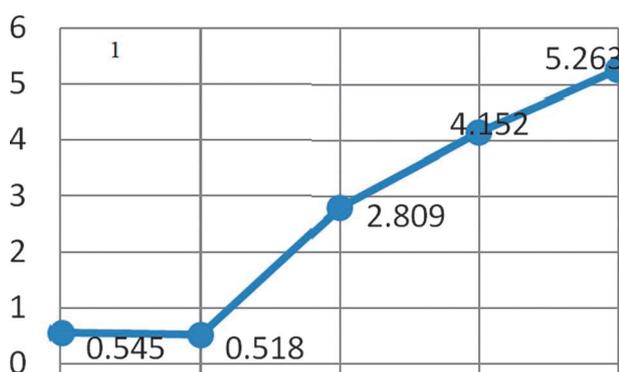


Рис. 8. Точечная биогенная нагрузка на водосбор реки Свяига
 Fig. 8. Local biogenic load on the catchment of the Sviyaga River

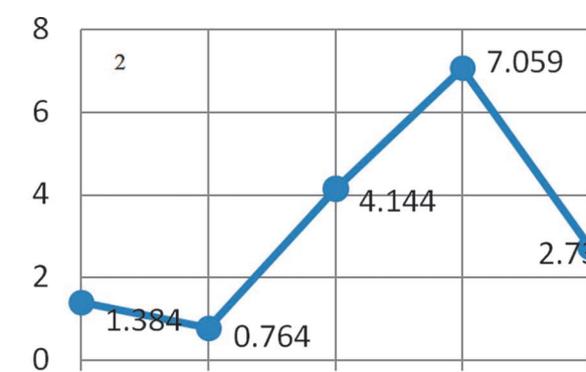


Рис. 9. Точечная биогенная нагрузка на водосбор реки Большой Черемшан
 Fig. 9. Local biogenic load on the catchment of the Bolshoy Cheremshan River

ния стоков и концентрация в них загрязняющих веществ, которые достаточно легко измерить.

Исходя из наглядного графического представления, только на водосборе Казанки наблюдается некоторое снижение точечной биогенной нагрузки, обоснованное значительным естественным разбавлением стока артезианской водой. В целом же, ввиду сравнительно небольших значений сбросов азота и фосфора отчитывающимися промышленными и муниципальными предприятиями, точечная нагрузка едва ли может сказаться на результатах оценки биогенного выноса.

Отсутствие или наличие плохо работающих, а чаще совсем не работающих систем ливневой канализации, самотек сточных вод по естественной овражно-балочной сети из отстойников, с территорий свалок, а также больших и малых неканализованных или псевдоканализованных населенных пунктов, отсутствие легитимной информации о качестве и количестве данной категории сточных вод говорит в пользу принятия решения перевода его в категорию диффузного загрязнения.

Рассеянные источники загрязнения с территорий, не занятых сельскохозяйственным производством

Наиболее сложными для контроля являются рассеянные стоки, не сформированные в русловые потоки поверхностные воды, стекающие по уклонам рельефа в тальвеги водотоков. Поступление поверхностного стока в реки усиливается в периоды выпадения осадков, паводков и половодья. Сток смывает загрязняющие вещества с подстилающей поверхности земли, частично диффундирует через почву, попадает в поверхностные грунтовые воды. Оценивать количество воды, попадающее при этом в реки, можно только расчетными методами, качество – посредством анализа характера использования водосбора и моделирования формирования гидрохимического состава руслового потока рек-приемников. Количество загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты, увеличивается благодаря интенсификации процесса субурбанизации – стихийного освоения периферического территориального

пространства, нарушающего структуру экологического каркаса по причине незавершенных и недостаточно продуманных схем защиты окружающей среды. Это стихийные повсеместные вырубki лесных массивов, распашка полей под урез воды, сопровождающаяся сведением пояса прибрежной растительности, которая является в естественных условиях защитным биофильтром рек. При оценке воздействия рассеянного стока, таким образом, необходимо учитывать множество параметров и потенциальных источников загрязнения.

К площадным рассеянными источникам в первую очередь следует отнести урбанизированные, селитебные, заброшенные территории, а также территориальные комплексы свалок, могильников и мест захоронения отходов. Загрязненный сток с подобных участков водосбора поступает с больших пространственных объектов, проходя естественные почвенные и растительные фильтры, и потому носит трудноидентифицируемый рассеянный характер. По этой причине на первом этапе для полноценного представления о загрязнении необходимо как можно более полный обзор точечных и рассеянных источников загрязнения аллохтонной приточности в водоемы-приемники, каковым в нашем случае является Куйбышевское водохранилище. Анализ процентного соотношения селитебных и облесенных территорий на его водосборе представлен на рис. 10 и 11.

Линейные рассеянные объекты представляют собой систему сооружений, включающую наземные, надземные и подземные конструктивные элементы, протяженность которых значительно превышает их ширину, и предназначенную для обеспечения передвижения и передачи материалов и веществ в интересах государства и местного населения [Шмакова, 2016; Градостроительный..., 2016]. Следует особо отметить, что в механизме перемещения и формирования стока на водосборе большую роль играют дороги (дорожные насыпи), и важно знать не только их количество, но и расположение в пространстве, поскольку протяженные насыпные техногенные препятствия способствуют перенаправлению и задержанию поверхностного стока, в частности, образующимися проточными и непроточными продольно-придорожными дренажными канавами (рис. 12).

В целом в ходе работы собраны данные по таким рассеянными источникам загрязнения в бассейнах рек Казанка, Мёша, Свияга и Большой Черемшан, как автомагистрали (по категориям), автозаправочные станции (АЗС), на-

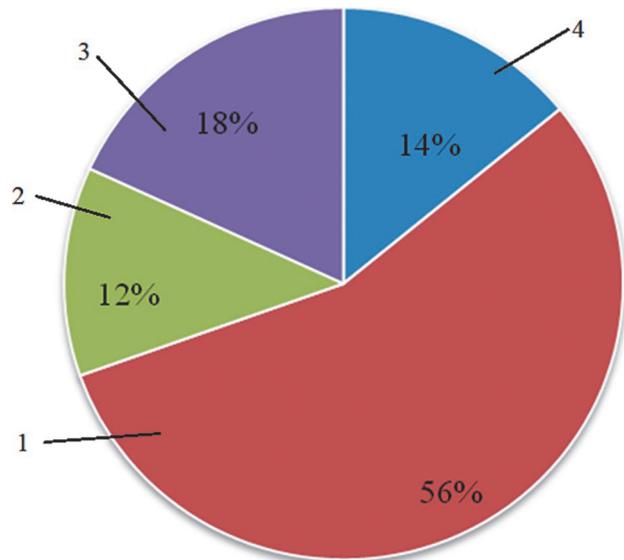


Рис. 10. Процентное соотношение селитебных территорий в пределах пилотных бассейнов рек Казанка (1), Мёша (2), Свияга (3), Большой Черемшан (4)

Fig. 10. Percentage of residential territories within the pilot basins of the Kazanka (1), Myosha (2), Sviyaga (3), Bolshoy Cheremshan (4) rivers

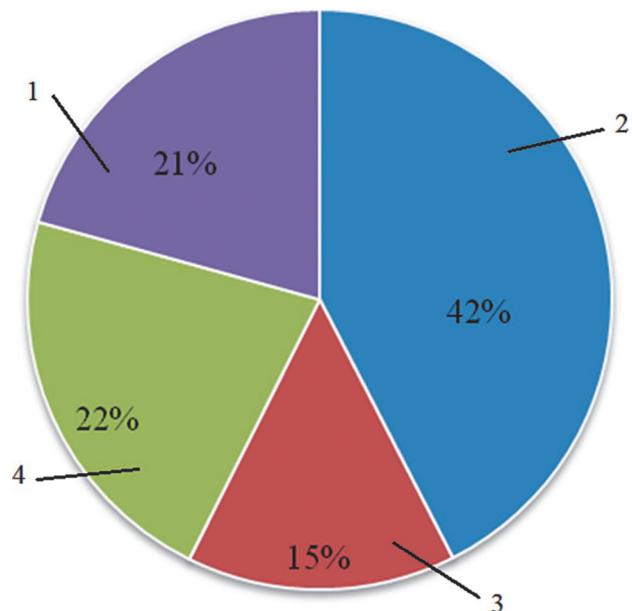


Рис. 11. Процентное соотношение облесенных территорий в пределах пилотных бассейнов рек Казанка (1), Большой Черемшан (2), Свияга (3), Мёша (4)

Fig. 11. Percentage of forested areas within the pilot basins of the Kazanka (1), Bolshoy Cheremshan (2), Sviyaga (3), Myosha (4) rivers

селенные пункты, промышленные площадки, полигоны твердых бытовых отходов (ТБО), неорганизованные свалки¹.

¹ Базы данных Института проблем экологии и недропользования АН РТ.

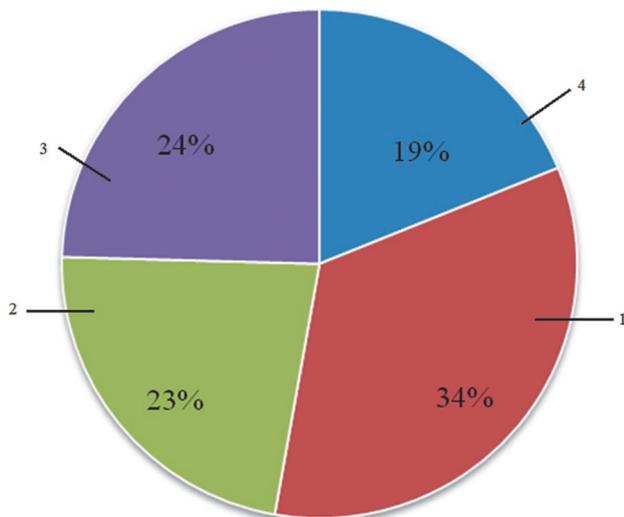


Рис. 12. Процентное соотношение площади и протяженности дорог в пределах пилотных бассейнов рек Казанка (1), Мёша (2), Свияга (3), Большой Черемшан (4)

Fig. 12. Percentage of the area and length of roads within the pilot basins of the Kazanka (1), Myosha (2), Sviyaga (3), Bolshoy Cheremshan (4) rivers

Расчеты показывают, что количество эксплуатационных земельных ресурсов, формирующих рассеянный сток, распределено по бассейнам неравномерно, например, наибольшая доля селитебных территорий находится в бассейне Казанки – 56 %, облесенных территорий больше в бассейне Большого Черемшана – 42 %, сельскохозяйственных земель – в бассейне Мёши и Свияги, по 43 %. Установлено, что дороги занимают сегодня значительную часть территории бассейнов рек. Так, в бассейне Свияги дорожными покрытиями, проложенными поверх земель разного назначения, занято 24 %, Казанки – 34 %, Мёши – 23 %, Большого Черемшана – 19 % территории.

Заключение

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что инвентаризация основных источников антропогенной нагрузки на водные объекты бассейна Куйбышевского водохранилища, расположенных на территориях пилотных бассейнов рек Казанки, Мёши, Свияги и Большого Черемшана, успешно проведена, чем подытожен первый этап разработки предупреждения и ликвидации негативного воздействия точечных и рассеянных источников загрязнения на водные объекты. Сформирована информационная основа для последующего создания баз данных и методов оценок поступления химических веществ в Куй-

бышевское водохранилище как с водосборов, контролируемых системой государственного мониторинга Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, так и с неконтролируемых территорий. Кроме того, с использованием собранных данных представляется возможным выполнить прогностические оценки предполагаемого изменения внешней нагрузки на изучаемые водные объекты в результате реализации таких водоохранных мероприятий, как разработка и внедрение наилучших доступных технологий ведения сельскохозяйственного производства и территориального управления в целом в бассейнах прямых притоков, обеспечивающих водными ресурсами Куйбышевское водохранилище.

Литература

- Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 30.12.2015) (с изм. и доп., вступ. в силу с 10.01.2016).*
- Вода России. Водохозяйственное устройство / Под науч. ред. А. М. Черняева. ФГУП РосНИИВХ. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. С. 31.*
- Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 27 августа 2009 г. № 1235-р). Гл. 2. Охрана водных объектов [Электронный ресурс]. URL: scrf.gov.ru/security/economic/document120/ (дата обращения: 07.11.2019).*
- Источники диффузного загрязнения: типизация, признаки, факторы воздействия. Инструктивный документ. М.: ИВП РАН, 2018. 19 с.*
- Куйбышевское водохранилище. Л.: Наука, 1983. 213 с.*
- Петров Б. Г. Куйбышевское водохранилище. Географические аспекты водоохранных мероприятий. М.: Экспресс, 2004. 320 с.*
- Шагидуллин Р. Р., Иванов Д. В., Горшкова А. Т., Урбанова О. Н., Токинова Р. П., Петров А. М. Биогенная нагрузка на поверхностные воды Республики Татарстан. Антропогенные факторы // Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения: Сб. мат. междунар. науч.-практ. конф. (18–19 мая. 2017 г.). Казань: ОТ Принт, 2017. С. 45–52.*
- Шмакова Д. А. Линейные объекты: понятие и виды // Политика, государство и право. 2016. № 4 [Электронный ресурс]. URL: http://politika.snauka.ru/2016/04/3804 (дата обращения: 08.08.2019).*
- Урбанова О. Н., Семанов Д. А., Горшкова А. Т. Программное обеспечение информационно-расчетной системы по оценке текущего и перспективного состояния водных ресурсов // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 12. С. 106–113. doi: 10.17076/eco447*

Поступила в редакцию 11.10.2019

References

Gradostroitel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 29.12.2004 N 190-FZ [The Town Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ dated 29.12.2004] (rev. 30.12.2015) (as amend. and suppl., came into force on Jan. 10, 2016).

Istochniki diffuznogo zagryazneniya: tipizatziya, priznaki, factory vozdeistviya na vodnye ob'ekty. Instruktivnyi dokument [Guidelines Sources of diffuse pollution: typification, signs, and factors of influence]. Moscow: IVP RAN, 2018. 26 p.

Kuibyshevskoe vodokhranilishche [Kuibyshevskoe Reservoir]. Leningrad: Nauka, 1983. 213 p.

Petrov B. G. Kuibyshevskoe vodokhranilishche. Geograficheskie aspekty vodookhrannykh meropriyatii [Kuibyshevskoe Reservoir. Geographical aspects of water conservation measures]. Moscow: Ekopress, 2004. 320 p.

Shagidullin R. R., Ivanov D. V., Gorshkova A. T., Urbanova O. N., Tokinova R. P., Petrov A. M. Biogennaya nagruzka na poverkhnostnye vody Respubliki Tatarstan. Antropogennye faktory [Biogenic load on surface waters in the Republic of Tatarstan. Man-induced factors]. *Global'noe rasprostranenie protsessov antropogenogo evtrofirovaniya vodnykh ob'ektov: problemy i puti resheniya*: Sb. mat. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (18–19 maya 2017 g.) [Global distribution of anthropogenic eutrophication processes in water bodies: prob-

lems and solutions: Proceed. int. sci.-pract. conf. (May 18–19, 2017)]. Kazan: OT Print, 2017. P. 45–52.

Shmakova D. A. Lineinye ob'ekty: ponyatie i vidy [Linear objects: the concept and types]. *Politika, gosudarstvo i pravo* [Politics, State, and Law]. 2016. No. 4. URL: <http://politika.snauka.ru/2016/04/3804> (accessed: 08.08.2019).

Urbanova O. N., Semanov D. A., Gorshkova A. T. Programmnoe obespechenie informatsionno-raschetnoi sistemy po otsenke tekushchego i perspektivnogo sostoyaniya vodnykh resursov [Computing and information systems software for the assessment of current and prospective condition of water resources]. *Trudy KarRC RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 12. P. 106–113. doi: 10.17076/eco447

Voda Rossii. Vodokhozyaistvennoe ustroistvo [Water in Russia. Water management]. Ed. A. M. Chernyaev. Ekaterinburg: AKVA-PRESS, 2000. 31 p.

Vodnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda (utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 27 avgusta 2009 g. № 1235-r) Gl. 2. Okhrana vodnykh ob'ektov [The water strategy of the Russian Federation for the period until 2020 (approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of August 27, 2009 No. 1235-r). Ch. 2. Water bodies protection]. URL: scrf.gov.ru/security/economic/document120/ (accessed: 07.11.2019).

Received October 11, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Поздняков Шамиль Рауфович

директор, д. г. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: tbgmaster@mail.ru
тел.: (812) 3870260

Шагидуллин Рифгат Роальдович

директор, д. х. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: Shagidullin_@mail.ru

Кондратьев Сергей Алексеевич

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

Брюханов Александр Юрьевич

главный научный сотрудник, д. т. н.
Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
Филитровское ш., 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург,
Россия, 196625
эл. почта: sznii@yandex.ru
тел.: (812) 4665716

CONTRIBUTORS:

Pozdnyakov, Shamil'

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

Shagidullin, Rifgat

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: Shagidullin_@mail.ru

Kondrat'ev, Sergey

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

Bryukhanov, Alexander

Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production, branch of the Federal Scientific
Agroengineering Center VIM
3 Filitrovskoe Sh., 196625 Pos. Tyarlevo, St. Petersburg, Russia
e-mail: sznii@yandex.ru
tel.: (812) 4665716

Шмакова Марина Валентиновна

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

Обломкова Наталья Сергеевна

научный сотрудник
Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
Филътровское ш., 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург,
Россия, 196625
e-mail: oblomkovan@gmail.com
тел.: (812) 4665716

Горшкова Асия Тихоновна

заведующая лаб. гидрологии, к. г. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: agorshkova@gmail.com
тел.: +79179106241

Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru

Горбунова Юлия Владимировна

младший научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: juliagorbunova18@mail.ru

Урбанова Ольга Николаевна

старший научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: urbanovoi@mail.ru

Бортникова Наталья Валерьевна

научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: nataly.bortnikova@gmail.com

Shmakova, Marina

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

Oblomkova, Natalya

Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production, branch of the Federal Scientific
Agroengineering Center VIM
3 Fil'trovskoe Sh., 196625 Pos. Tyarlevo, St. Petersburg, Russia
e-mail: oblomkovan@gmail.com
tel.: (812) 4665716

Gorshkova, Asiya

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: agorshkova@gmail.com
tel.: +79179106241

Ivanov, Dmitry

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: water-rf@mail.ru

Gorbunova, Yulia

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: juliagorbunova18@mail.ru

Urbanova, Olga

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: urbanovoi@mail.ru

Bortnikova, Natalya

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Tatarstan, Russia
e-mail: nataly.bortnikova@gmail.com

УДК 528.94

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ

Т. Ю. Выручалкина

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Приведены результаты работ по созданию цифровой модели рельефа дна залива Кара-Богаз-Гол. Информационной основой при создании цифровой модели рельефа послужили топографические карты 1986–1989 гг. масштаба 1:200 000 и 1:100 000. Цифровая модель рельефа дна создана по результатам оцифровки топографических карт. Работы по созданию цифровой модели рельефа проходили последовательно в несколько этапов. На первом этапе в соответствии с исходной системой координат (Пулкovo 1942) проводилась цифровая привязка сканированных изображений топографических карт. Далее карты оцифровывались. Полученные цифровые данные проинтерполированы на узлы регулярной сетки. На стадии проверки результатов на базе созданных GRD-моделей выполнены визуальный контроль полученных контуров изолиний и значений отметок глубин, исправление неточностей. В итоге создана цифровая модель рельефа дна залива с пространственным разрешением 100×100 м. Получены морфометрические зависимости для Кара-Богаз-Гола – между уровнем и площадью зеркала залива, между уровнем и наполнением водоема. Выше отметки –30 м БС залив Кара-Богаз-Гол имеет крутые и обрывистые берега. От отметки –30 м БС до –34 м берега имеют уклон 30–45 %, ниже отметки –34 м БС – практически плоское дно. Морфометрические характеристики коренной чаши залива Кара-Богаз-Гол существенно изменяются в зависимости от положения уровня воды моря и залива. Площадь водоема между отметками –25 и –30 м БС изменяется мало, в дальнейшем сокращаясь к отметке –35,6 м БС.

Ключевые слова: Кара-Богаз-Гол; цифровая модель рельефа; батиметрическая карта; морфометрия; Каспийское море.

T. Yu. Vyruchalkina. DEVELOPMENT OF A DIGITAL ELEVATION MODEL OF KARA-BOGAZ-GOL BAY

The article presents the results of the efforts to create a digital elevation model of Kara-Bogaz-Gol Bay. The informational background for the digital elevation model was maps of 1:200 000 and 1:100 000 scales. The digital elevation model was created by digitizing topographic maps. The development process was organized sequentially in several stages. At the first stage, scanned images of topographic maps were referenced in accordance with the original coordinate system (Pulkovo 1942). Next, the maps were digitized. The resultant digital data were interpolated to the grid nodes. At the verification stage, the contour lines and depth values were visually checked on the basis of GRD models, and flaws were corrected. As a result, the digital elevation model of the bay bed was created with a spatial resolution of 100×100 m. Morphometric relationships were obtained for Kara-Bogaz-Gol – between the level and the area of the bay water surface, between the level and the storage of the bay. Kara-Bogaz-Gol Bay has an irregular shape. Its

shores above –30 m BS elevation are steep and precipitous. Between –30 and –34 m BS elevation the shore slope is 30–45 %, and an almost flat bed extends below –34 m BS. The rock basin morphometry of Kara-Bogaz-Gol Bay varies significantly depending on the water level in the sea and in the bay. The area of the waterbody remains almost invariable between –25 and –30 m BS height marks, and then shrinks towards –35.6 m BS elevation.

Key words: Kara-Bogaz-Gol; digital elevation model; bathymetric map; morphometry; Caspian Sea.

Введение

Залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) – один из самых крупных гипергалинных водоемов на планете. Он расположен на восточном побережье Среднего Каспия на территории Туркменистана между 40°31' и 42°29' с. ш., 52°43' и 54°46' в. д. Это самая обширная на Каспии лагуна, отделенная от моря двумя песчаными косами с непостоянной береговой линией. Между ними находится пролив длиной 7–9 км, шириной от 120 до 800 м и глубиной 3–6 м. В его соляных залежах найдено почти 20 солевых минералов, которые являются ценным сырьем для промышленности и сельского хозяйства.

Изучение залива началось в 1715 г. с экспедиции князя А. Бековича-Черкасского и составления первых географических карт береговой линии КБГ и Каспийского моря в этом районе. Дальнейшие изыскания здесь были продолжены только 120 лет спустя. В 1836 г. Г. С. Карелин установил, что залив бессточный, а вода из него интенсивно испаряется вследствие воздействия сухого и жаркого климата окружающей его пустыни. В 1847 г. И. М. Жеребцов составил описание залива и подготовил географические карты. При измерении глубин и взятии проб грунта со дна Жеребцовым было установлено, что подстилающий слой грунта состоял из соли. На рубеже XIX–XX вв. основной целью экспедиций было изучение солевых ресурсов залива и выявление причин гибели рыб в нем [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988; Карпычев, 2007; Kosarev et al., 2009, 2013].

Широкое изучение и использование природных ресурсов КБГ началось в советский период. В 1921–1923 годах в заливе выполняла обширные исследования в области метеорологии, гидрологии и гидрохимии специальная многоцелевая экспедиция. И в дальнейшем до начала 1990-х годов изыскания в заливе проводились на относительно регулярной основе [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988; Гидрометеорология..., 1996]. Однако в литературных источниках батиметрия залива

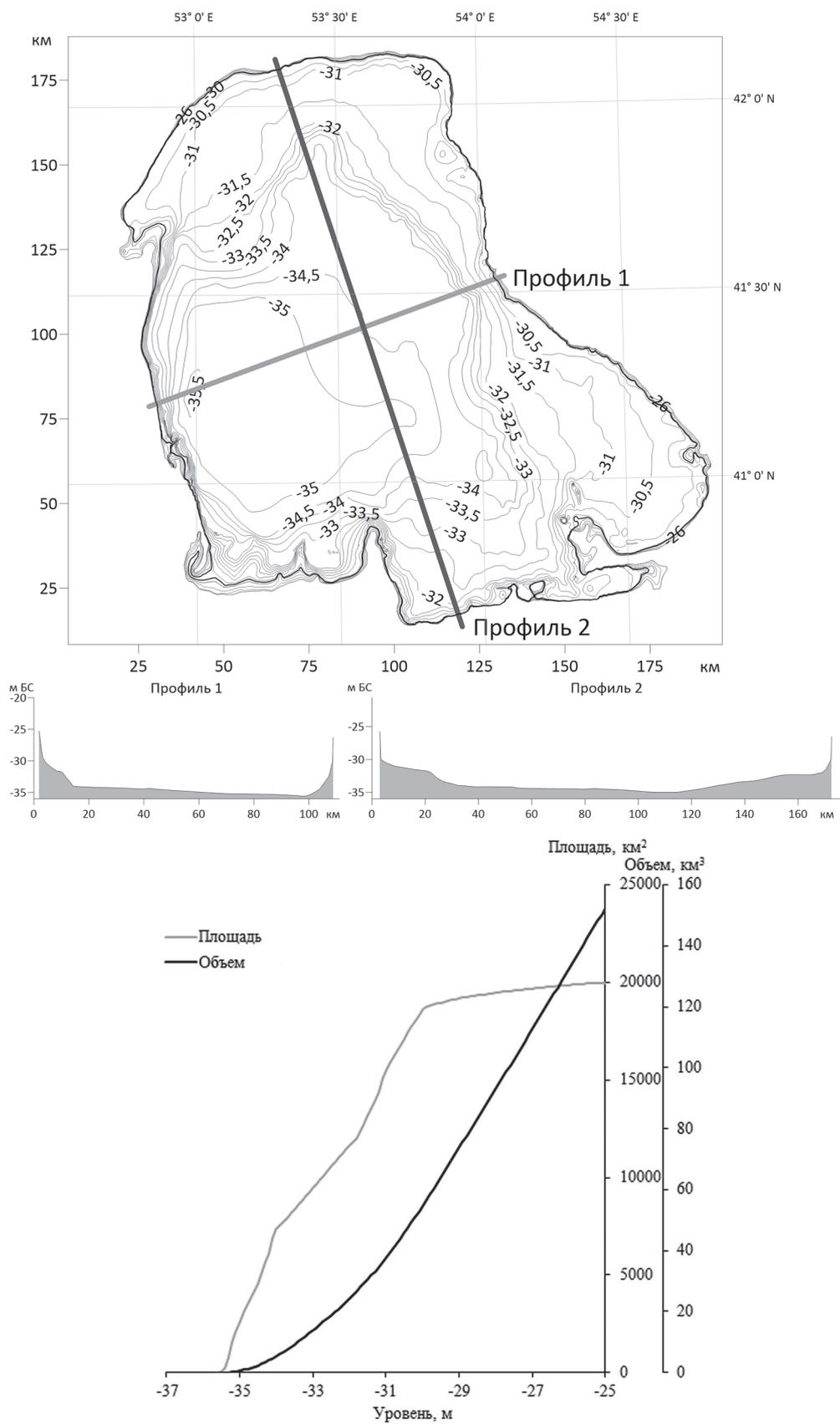
представлена лишь схематическими картами, а морфометрические зависимости – только в виде нескольких пар величин «уровень-зеркало» и «уровень-объем вод залива». Вероятно, это связано с тем, что береговая линия залива и рельеф дна значительно менялись во времени. В цифровом виде рельеф дна КБГ отсутствует.

Цель настоящей работы – создание цифровой модели рельефа (ЦМР) и определение морфометрических зависимостей залива Кара-Богаз-Гол. Развитие цифровых технологий и методов моделирования позволяет с помощью ЦМР выполнить эксперименты по расчету площадей и объемов заполнения залива, водно-солевого баланса залива в зависимости как от реальных, так и от прогностических значений уровня Каспийского моря и стока каспийских вод в залив. ЦМР может стать полезным инструментом в исследовании эволюции рельефа дна залива и его морфометрических характеристик. Важным условием получения качественного результата при этом является точная ЦМР дна КБГ.

Материалы и методы

Информационной основой при создании ЦМР дна залива послужили топографические карты масштаба 1:200 000 и 1:100 000, опубликованные в 1986–1989 годах Главным управлением геодезии и картографии СССР.

Работы по созданию ЦМР проходили последовательно в несколько этапов, алгоритм описан в [Выручалкина, Фролов, 2018; Фролов и др., 2018]. На первом этапе в соответствии с исходной системой координат (Пулкова 1942) проводилась географическая привязка картографического материала. Далее карты векторизовались с заданием отметок глубин на основе исходных карт. Полученные цифровые данные с помощью метода Естественная окрестность, или Natural Neighbor [Sibson, 1981] были проинтерполированы на узлы сетки путем взвешивания соседних точек данных на основе пропорциональных областей. Алго-



Карта залива Кара-Богаз-Гол (в м БС) с профилями (а) и его морфометрические зависимости (б)

Map of the Kara-Bogaz-Gol Bay (in m BS) with profiles (a) and morphometric dependences (b)

ритм интерполяции Natural Neighbor использует взвешенное среднее соседних наблюдений, где веса пропорциональны «занимаемой площади». Метод Natural Neighbor не экстраполирует контуры за пределы оболочки местоположений данных. На стадии проверки результатов на базе «черновых GRD-моделей» выполнялся визуальный контроль полученных контуров изолиний и значений отметок глубин, исправление неточностей. Таким образом была создана ЦМР дна КБГ с пространственным разрешением 100×100 м.

Результаты

Залив вытянут в северо-запада на юго-восток и имеет размеры по 41-й параллели 151 км, а по меридиану 53°45′ – 167 км. Из-за разницы уровней между Каспийским морем и КБГ морская вода поступает по проливу в залив, где полностью испаряется (в среднем 800–1000 мм/год). При понижении уровня Каспийского моря ниже отметки –30 м БС происходит полное отделение залива от моря. На рисунке представлена топография местности, ограниченная по высоте на отметке –25 м БС. Эта отметка выбрана в соответствии с данными о колебаниях уровня воды в заливе за последние 100 лет [Лавров, 2000; Leroy et al., 2006; Карпычев, 2007] как наблюдавшийся максимум.

Выше отметки –30 м БС залив КБГ имеет крутые и обрывистые берега (рис., а, профиль 1, 2). От отметки –30 м БС до –34 м берега имеют уклон 30–45 %, ниже отметки –34 м БС – практически плоское дно. Морфометрические зависимости коренной чаши залива Кара-Богаз-Гол существенно меняются от положения уровня воды залива. От отметки –25 до –30 м БС площадь водоема медленно убывает, от ~ 20 до 18,6 тыс. км² соответственно. При этом происходит интенсивное уменьшение объема залива, с 150 до 50 тыс. км³. Затем площадь зеркала залива быстро сокращалась до 0 м² к отметке –35,6 м БС. Так, согласно [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988], среднегодовой уровень рапы в заливе с отметок –28 м БС в конце 1930-х годов опустился до отметок –33,5 м БС и ниже в 1980-х годах (в отдельные месяцы залив почти полностью пересыхал). При этом площадь залива сократилась с ~19000 до 6000 км², а объем с 93 до ~8 км³. Здесь необходимо уточнить, что на морфометрические характеристики залива оказывает влияние и его водно-солевой баланс. При существенном снижении объема воды КБГ происходит рост концентрации солей в рассоле

и изменение его химического состава, что приводит к их кристаллизации и выпадению в осадок. Вследствие этого процесса дно бассейна поднимается, изменяются морфометрические характеристики залива. После ликвидации плотины в проливе Кара-Бога-Гол среднегодовой уровень воды в заливе к 1996–1997 гг. поднялся до отметки –27,5 м БС, площадь залива и объем составили 19500 км² и 100 км³ соответственно. Зависимости площади зеркала и объема чаши залива от уровня воды приведены на рисунке (б).

Выводы

За последнее столетие уровень воды в заливе Кара-Бога-Гол вслед за колебаниями Каспийского моря претерпевал значительные изменения, что отражалось на морфометрических характеристиках залива. Так, с 1930-х к 1980-м годам площадь залива сократилась в три раза, а объем – почти десятикратно. К началу XXI в. произошло наполнение залива каспийскими водами, и, соответственно, площадь и объем залива вернулись к величинам 1930-х годов.

Полученная модель рельефа дна КБГ и его морфометрические зависимости в дальнейшем могут быть использованы для моделирования водно-солевого баланса залива, исследования эволюции рельефа дна, построения прогноза уровня воды залива, а также для прогноза уровня Каспийского моря, учитывая демпфирующую роль оттока воды в залив.

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (рег. № АААА-А18-118022090056-0) государственного задания ИВП РАН.

Литература

Выручалкина Т. Ю., Фролов А. В. Батиметрические и морфометрические характеристики Большого Яшалтинского озера в моделировании водно-солевого баланса водоема // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 319–328. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-319-328

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Справочник / Под ред. Ф. С. Терзиева, М. П. Максимовой, Е. А. Яблонской. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 324 с.

Карпычев Ю. А. Изменчивость осадконакопления залива Кара-Богаз-Гол в связи с колебаниями уровня моря в новокаспийское время // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 918–926.

Кара-Богаз-Гол вчера, сегодня, завтра / Авт.-сост. В. И. Аковецкий, И. Я. Богданов; Отв. ред. акад. АН СССР А. Г. Аганбегян, акад. АН СССР О. Г. Овезгельдыев. Ашхабад: Ылым, 1988. 340 с.

Лавров Д. А. Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа воды // Экологические проблемы Каспия. РАН и Нац. акад. США: Сб. докл. Междунар. науч. семинара по экологическим проблемам Прикаспийского региона (Москва, 1–3 дек. 1999 г.) / Под ред. М. Г. Хубларяна. М.-Киров, 2000. С. 17–21.

Лепешков И. Н., Буйневич Д. В., Буйневич Н. А., Седельников Г. С. Перспективы использования солевых богатств Кара-Богаз-Гола. М.: Наука, 1981. 274 с.

Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Саркисян С. Г. Динамико-стохастическое моделирование водно-солевого баланса большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 3. С. 227–234. doi: 10.7868/S0321059618030021

References

Frolov A. V., Vyruchalkina T. Yu., Sarkisyan S. G. Modeling water and salt balance of Lake Bolshoe Yashaltinskoe. *Water Resources*. 2018. Vol. 45, no. 3. P. 318–325. doi: 10.1134/S0097807818030053

Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei. T. 6. Kaspiiskoe more. Vyp. 2. Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoi produktivnosti. Spravochnik [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6. Caspian Sea. Iss. 2. Hydrochemical conditions and oceanological bases of biological productivity formation. A guide]. Eds. F. S. Terziev, M. P. Maksimova, E. A. Yablonskaya. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996. 324 p.

Kara-Bogaz-Gol vchera, segodnya, zavtra [Kara-Bogaz-Gol yesterday, today, tomorrow]. Compiled by V. I. Akovetsky, I. Ya. Bogdanov; Editors-in-chief A. G. Aganbegyan, acad. USSR Acad. Sci., O. G. Ovezgeldyev, acad. USSR Acad. Sci. Ashkhabad: Ylym, 1988. 340 p.

Karpychev Yu. A. Variations in the sedimentation in Kara Bogaz Gol Bay related to sea level fluctuations during the Novocaspian time. *Oceanology*. 2007. Vol. 47, no. 6. P. 857–864. doi: 10.1134/S0001437007060100

Lavrov D. A. Gidrologicheskii rezhim zaliva Kara-Bogaz-Gol v usloviyakh svobodnogo dostupa vody [Hydrological regime of the Kara-Bogaz-Gol Bay in the conditions of free water access]. *Ekol. probl. Kaspiya. RAN i Nats. akad. SShA: Sb. dokl. Mezhd. nauch. seminara po ekol. probl. Prikaspiiskogo regiona (1–3 dek. 1999 g., Moskva)* [Environmental probl. of the Caspian Sea. RAS and United St. National Acad.: Proceed. int. sci. seminar on environmental probl. of the Caspian region (Dec. 1–3, 1999, Moscow)]. Ed. M. G. Khublarian. Moscow-Kirov, 2000. P. 17–21.

Leroy S. A. G., Marret F., Giralte S., Bulatov S. A. Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz-Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records // *Quat. Int.* 2006. Vol. 150, no. 1. P. 52–70. doi: 10.1016/j.quaint.2006.01.007

Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution // *Aquat. Geochem.* 2009. Vol. 15, no. 1–2. P. 223–236. doi: 10.1007/s10498-008-9054-z

Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Zhiltsov S. S. The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay // Zonn I., Kostianoy A. (eds). *The Turkmen Lake Altyn-Asyr and Water Resources in Turkmenistan. The Handbook of Environmental Chem.* Vol. 28. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/698_2013_228

Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 1981. P. 21–36.

Поступила в редакцию 18.02.2020

Lepeshkov I. N., Buinevich D. V., Buinevich N. A., Sedel'nikov G. S. Perspektivy ispol'zovaniya solevykh bogatstv Kara-Bogaz-Gola [Prospects for using the salt wealth of Kara-Bogaz-Gol]. Moscow: Nauka, 1981. 274 p.

Vyruchalkina T. Yu., Frolov A. V. Batimetricheskie i morfometricheskie kharakteristiki Bol'shogo Yashaltinskogo ozera v modelirovanii vodno-solevogo balansa vo doema [Bathymetric and morphometric characteristics of Lake Bolshoe Yashaltinskoe in the modeling of the reservoir water-salt balance]. *InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24(2). P. 319–328. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-319-328

Leroy S. A. G., Marret F., Giralte S., Bulatov S. A. Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz-Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records. *Quat. Int.* 2006. Vol. 150, no. 1. P. 52–70. doi: 10.1016/j.quaint.2006.01.007

Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution. *Aquat. Geochem.* 2009. Vol. 15, no. 1–2. P. 223–236. doi: 10.1007/s10498-008-9054-z

Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Zhiltsov S. S. The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay. Zonn I., Kostianoy A. (eds). *The Turkmen Lake Altyn-Asyr and Water Resources in Turkmenistan. The Handbook of Environmental Chem.* Vol. 28. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/698_2013_228

Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 1981. P. 21–36.

Поступила в редакцию 18.02.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Выручалкина Татьяна Юрьевна
старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 11933
эл. почта: vyruchi@list.ru

CONTRIBUTOR:

Vyruchalkina, Tatiana
Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: vyruchi@list.ru

ЮБИЛЕИ И ДАТЫ

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ФИЛАТОВ (к 75-летию со дня рождения)



9 апреля 2020 г. исполнилось 75 лет члену-корреспонденту РАН, доктору географических наук, профессору Николаю Николаевичу Филатову.

В 1965 г. Н. Н. Филатов окончил Ленинградский топографический техникум. Работал топографом в Карелии, Архангельской и Вологодской областях. В 1971 году, завершив учебу в Ленинградском государственном университете (ЛГУ) на кафедре океанологии географического факультета, по распределению направлялся в Морскую гидрографию

в г. Ломоносове, но по предложению заведующего кафедрой океанологии ЛГУ Героя Советского Союза В. Х. Буйницкого и профессора Н. А. Лабзовского был приглашен в аспирантуру созданного в том же году Института озераведения (ИНОЗ) АН СССР. На географическом факультете ЛГУ его учителями были В. Х. Буйницкий, Н. А. Лабзовский, В. А. Рожков, Л. А. Тимохов, В. Р. Фукс, Р. Г. Григоркина, А. А. Дмитриева, В. В. Клепиков. ИНОЗ АН СССР возглавляли крупные ученые и организаторы науки – академики С. В. Колесник, А. Ф. Трешников и чл.-корр. РАН О. А. Алекин.

В 1974 г. Н. Н. Филатов защитил кандидатскую диссертацию по исследованию гидродинамики Ладожского озера. После окончания аспирантуры ИНОЗ РАН он работал в этом институте сначала в должности младшего, а затем старшего научного сотрудника. Проводил исследования термогидродинамических процессов и явлений на крупнейших озерах Европы по разработанным им программам «Ладэкс», «Онего», а также комплексное изучение озер Севан (Севанская проблема), Балхаш, Байкал, Красное, Рыбинского водохранилища, озер Финляндии, Болгарии и Канады. В результате экспериментальных исследований и моделирования оз. Севан было показано, что для восстановления экосистемы озера необходимо поднять его уровень на 6 м. В 1970–1980-х гг. Николай Николаевич работал на Великих Американских озерах в Канадском центре внутренних вод, в Международном институте системного анализа (Австрия), в Финляндии, Болгарии, ГДР.

В дальнейшем большое влияние на становление Н. Н. Филатова как ученого оказали академики А. С. Саркисян, О. Ф. Васильев, К. Я. Кондратьев. В результате обобщения исследований им были изучены закономерности гидродинамики вод в разнотипных озерах, получены новые представления о течениях, внутренних волнах апвеллингах, мелкомасштабной турбулентности в разнотипных озерах. Сотрудничество с академиком А. С. Саркисяном и его учениками позволило Николаю Николаевичу внедрить в лимнологию методы гидродинамического синтеза наблюдений и моделирования, разработанные для океана. Он участвовал в экспериментах по государственной программе «Разрезы», внесших существенный вклад в развитие наших представлений об энергообмене в Мировом океане. Им выполнены численные эксперименты для решения принципиальных вопросов формирования, генерации, устойчивости широкого класса гидродинамических процессов и явлений в озерах. Результаты моделирования и экспериментов легли в основу блока «перемешивание, водообмен» моделей экосистем озер Севан, Онежское, Ладожское, Балхаш, Несиярви (Финляндия) – для оценки состояния и изменений экосистем этих озер при разных сценариях антропогенных воздействий и изменений климата. В 1983 г. в Гидрометеоиздате вышла первая монография Н. Н. Филатова «Динамика озер», которая стала обобщением выполненных исследований.

В том же году Н. Н. Филатов переходит из лаборатории гидрофизики ИНОЗ АН СССР в лабораторию дистанционных методов этого же института, созданную академиком К. Я. Кондратьевым. Николай Николаевич участвует в исследованиях по программе «Интеркосмос», в реализации уникальных экспериментов на ряде озер мира по использованию разнообразных (в видимом, ИК, тепловом, радио- и др. диапазонах) дистанционных методов в гидрологии. Были внедрены в практику методы спутниковой лимнологии. По данным изучения явлений на поверхности озер показаны возможности восстановления термогидродинамических процессов и полей в толще озерных вод. Исследованы малоизученные ранее в лимнологии явления и процессы (когерентные структуры в озерах, вихри, внутренние волны, фронты, апвеллинги, особенности распространения и трансформации сточных, загрязненных вод). Разработан метод оперативного диагноза циркуляции вод по данным дистанционного зондирования.

В 1988 г. Николай Николаевич принимает решение уехать из родного Ленинграда и,

пройдя конкурс, становится заведующим отделом водных проблем Карельского филиала АН СССР в Петрозаводске. В 1991 г. в издательстве «Наука» выходит его монография «Гидродинамика озер», написанная по докторской диссертации, которую незадолго до этого он защитил на географическом факультете МГУ (в 1992 г. Н. Н. Филатов утвержден доктором географических наук). В том же году он становится директором-организатором Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), созданного на базе возглавляемого им отдела. Институт активно сотрудничает со многими ведущими институтами и университетами, как российскими (СПбГУ, МГУ, ИНОЗ РАН, ИО РАН, ИВМ, ИВП, ММБИ и др.), так и зарубежными, в первую очередь – с Канадским центром внутренних вод, Институтом окружающей среды (Финляндия), Университетами Лунда и Уппсала (Швеция) и др. ИВПС КарНЦ РАН становится соучредителем Международного фонда дистанционных методов и окружающей среды им. Нансена в Санкт-Петербурге (Нансен-центр). Под руководством и при непосредственном участии Н. Н. Филатова в рамках программ фундаментальных исследований РАН, а также проектов РФФИ и ИНТАС выполнен цикл работ по изучению влияния климата и антропогенных факторов на экосистемы водоемов. По результатам исследований определены особенности нестационарности гидрологического режима озер, элементов водного баланса и уровня крупнейших озер Европы. Выявлены закономерности изменения водных экосистем Ладожского и Онежского озер при разных сценариях изменений климата. Результаты совместных с Нансен-центром исследований озер мира с применением дистанционных методов были обобщены и опубликованы в издательстве «Springer-Praxis» – монография «Limnology and Remote sensing» (1999) под редакцией К. Я. Кондратьева и Н. Н. Филатова.

Под руководством Н. Н. Филатова осуществлен широкий комплекс исследований и дана оценка водоресурсного потенциала Европейского Севера России как одного из важнейших факторов размещения производительных сил, выполнена большая работа по общероссийской программе улучшения водоснабжения населения Севера России с использованием поверхностных и подземных вод. Он принял участие в разработке с использованием ГИСТехнологий классификации качества воды разнотипных озер, создании электронных реестров, каталогов, баз данных, информационно-



15 лет Институту водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. Сотрудники ИПВС и их коллеги



Учредители Фонда им. Нансена. 2001 г.

справочных систем по рекам и озерам, которые внедрены в практическую деятельность ряда министерств.

В 1990-е годы Николай Николаевич возглавил комплексные системные исследования

Белого моря по ряду международных и российских проектов, таких как ИНТАС, ИНКО-Коперникус, РФФИ. За последние 20 лет совместно с ААНИИ, ИО РАН, Нансен-центром, а затем с ИВМ РАН и ИПМИ КарНЦ РАН проведены

комплексные натурные исследования термогидродинамики и экосистемы Белого моря, с О. П. Савчуком и И. А. Нееловым разработаны и внедрены 3D математические модели экосистемы Белого моря. В 2018–2020 гг. совместно с В. В. Меншуткиным и П. В. Дружининым разработаны когнитивные модели социо-эколого-экономической системы Белого моря и водосбора. Даны прогнозы изменения экосистем моря при разных сценариях изменений климата и развития экономики региона.

Эти исследования обобщены и опубликованы в коллективных монографиях при соавторстве и под редакцией Н. Н. Филатова и А. Ю. Тержевика как в нашей стране («Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов», 2007), так и за рубежом («White Sea: Its Marine environment and Ecosystem dynamics influenced by global change», Springer-Praxis, 2005). В дальнейшем Николай Николаевич участвует в реализации программ «Мировой океан» (рук. академик Г. Г. Матишов) и «Система Белое море» (рук. академик А. П. Лисицын).

Н. Н. Филатов – автор, соавтор и/или редактор более 400 научных работ, в том числе 120 – по исследованию экосистем прибрежных зон морей и озер, 14 монографий и сборников трудов. Совместно с профессорами Л. А. Руховцом и В. В. Меншуткиным им выполнен большой цикл работ по внедрению математических моделей для прогноза изменений экосистем Великих озер Европы: Ладожского и Онежского, а также по применению методов теории искусственного интеллекта для изучения малоиссле-

дованных озер. По результатам исследований опубликовано несколько монографий и трудов. Наиболее известные из них: «Ladoga And Onego – Great European Lakes: Modeling and Experiment» (Ред. Л. Руховец и Н. Филатов. 2010), «Strongly Nonlinear Internal Waves in Lakes» (Ред. К. Hutter. 2012), «Онежское озеро. Атлас» (Отв. ред. Н. Н. Филатов. 2010), «Озера Карелии» (Ред. Н. Филатов, В. Кухарев. 2013); «Крупнейшие озера – водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» (Отв. ред. Н. Н. Филатов. 2015); «Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study» (Inland Waters. 2019). В 2018–2019 гг. как соавтор и редактор он выполнил обобщение совместных ИВПС КарНЦ РАН, ИВМ, ИВП и ИНОЗ РАН фундаментальных исследований гидрологического режима и экосистем крупнейших внутренних водоемов России в монографии «Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем Великих озер России» (Петрозаводск, 2020).

В течение последних 20 лет Н. Н. Филатов был организатором и участником исследований на многих озерах мира, прибрежных зон Белого моря, Финского залива, а также Гавайских островов (под рук. академика В. Г. Бондура), Программы Отделения наук о Земле РАН «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (рук. академик В. А. Румянцев и чл.-корр. РАН В. И. Данилов-Данильян). Своими теоретическими и экспериментальными работами Н. Н. Филатов



Н. Н. Филатов, К. Я. Кондратьев, Т. Хейердал, О. Ф. Васильев, О. Иоханнесен. 2002 г.

внес существенный вклад в раскрытие закономерностей процессов функционирования экосистем водоемов, развития процессов эвтрофирования озер, а также эстуариев и прибрежных зон.

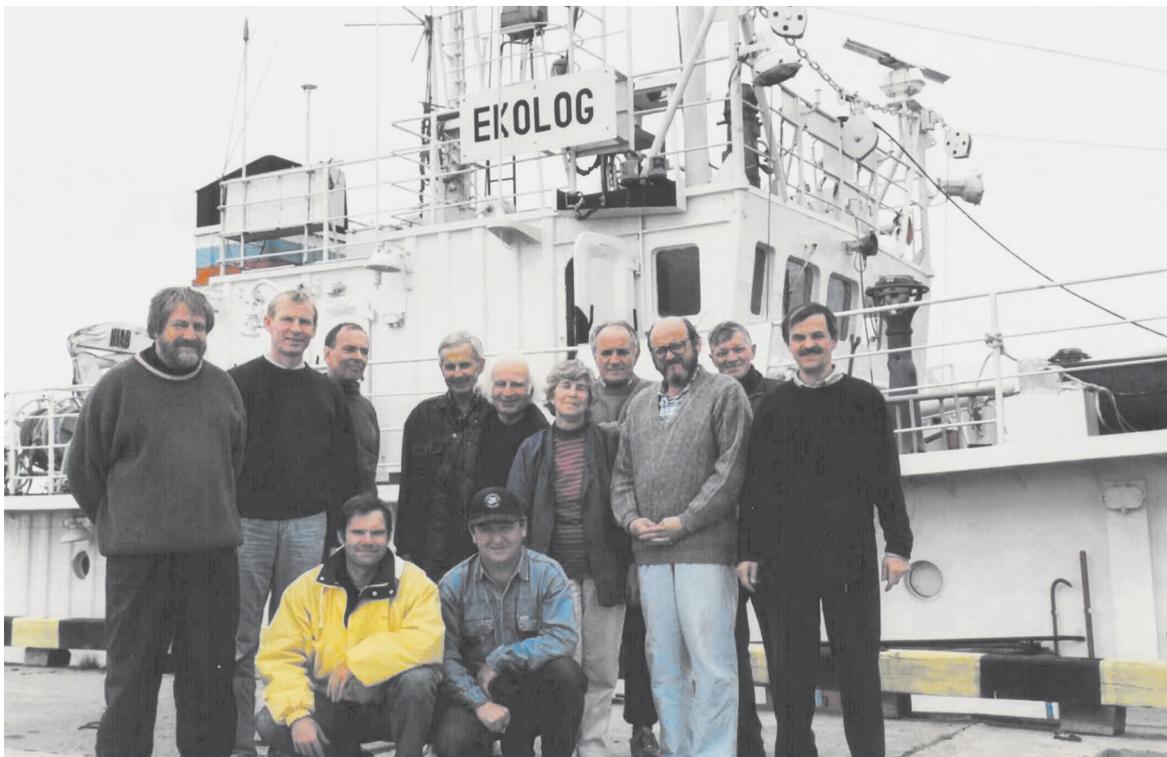
Более 30 лет Николай Николаевич руководил работой молодых специалистов, студентов и аспирантов по специальностям «Геоэкология» и «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия», подготовил 12 кандидатов наук. В 1998 г. ему присвоено звание профессора. С 1993 по 2013 г. он являлся профессором кафедры географии Карельского государственного педагогического университета, а в 2013–2015 гг. заведовал кафедрой географии, созданной в Петрозаводском государственном университете.

Н. Н. Филатов – член ряда международных научных организаций (Международная ассоциация лимнологов (SIL), Северные исследовательские бассейны (NRB)) и редколлегий периодических изданий – «Geophysica», «Водные ресурсы», «Труды Карельского научного центра РАН», «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», «Региональная экология», «Труды ААНИИ», «Ученые записки РГГМУ».

Он принимал участие в работе Законодательного собрания РК, Совета Федерации

и Госдумы РФ, где представлял результаты исследований Ладожского и Онежского озер для обоснования проекта федерального закона и приоритетного проекта рационального использования ресурсов и охраны экосистем озер. Готовил аналитические записки по запросу ОНЗ РАН (для Совета Безопасности РФ) – об охране экосистем Ладожского и Онежского озер, о проведении комплексных научных исследований состояния водоемов территории Российской Федерации, о дополнительных мерах по обеспечению экологической безопасности на особо охраняемых природных территориях, о реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года; для Минобрнауки РФ – Проект создания комплексного полигона на Белом море и Ладожском озере в рамках программы «Арктические технологии», о выполнении фундаментальных и прикладных исследований, связанных с изменением климата, и др.

Н. Н. Филатов является экспертом РФФИ, ОНЗ РАН, Минобрнауки РФ, Президентских проектов, Русского географического общества (РГО). Также он председатель Карельского отделения РГО, член Президиума РГО, член Ученых советов по защите диссертаций



На Белом море, 2001 г. Слева направо: Е. В. Семенов, А. В. Фролов, А. Л. Бреховских, А. В. Мирабель, А. С. Саркисян, С. П. Гусарова, В. Залесный, В. П. Дымников, В. Крылов, Н. Филатов. Сидят: Н. Г. Яковлев, капитан «Эколога» С. В. Прошкин



Нобелевский лауреат академик Ж. И. Алферов с сотрудниками Карельского научного центра РАН, 2009 г. Слева направо: В. Я. Горьковец, В. В. Мазалов, Н. Н. Филатов, В. И. Крутов, А. Д. Сорокин, Н. Н. Немова, Ж. И. Алферов, В. И. Кухарев, А. Ф. Титов, И. И. Муллонен, А. И. Шишкин

МГИ и ММБИ РАН, член Ученых советов ИВПС КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», член Советов по гидросфере при Министерстве науки и высшего образования РФ, по водным ресурсам и глобальной экологии при Президиуме РАН, Президент фонда «Нансен-центр».

В 1996–2003 гг. Н. Н. Филатов становился лауреатом государственной научной стипендии для ученых России. За свою научную и научно-организационную деятельность он удостоен знака «Заслуженный геодезист», почетных званий «Заслуженный деятель науки Ка-

релии» и «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

В настоящее время Н. Н. Филатов – советник председателя ФИЦ «Карельский научный центр РАН», главный научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН и экспертно-аналитической группы Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН.

Коллеги сердечно поздравляют Николая Николаевича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых творческих успехов.

«ЗА ОТКРЫТИЯМИ ВО ВСЕ НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО ИДТИ В ОКЕАН»

Из разных интервью Н. Н. Филатова

– **Николай Николаевич, как Вы попали в науку?**

– Неожиданно для себя. После учебы в Ленинградском топографическом техникуме работал топографом в Карелии, Вологодской и Архангельской областях. Геодезист, топограф, хотел работать в этой профессии и дальше, о науке не помышлял. Затем продолжил образование на географическом факультете Ленинградского государственного университета, где учился с 1966 по 1971 г. После 1 курса вечернего отделения ЛГУ мой друг А. Масанов решил перейти на кафедру океанологии, а я отправился с ним за компанию, чтобы поддержать. С волнением мы вошли в кабинет заведующего кафедрой – профессора В. Х. Буйницкого. Легендарная личность. Он получил звание Героя Советского Союза в 29 лет – после знаменитого дрейфа на судне «Георгий Седов». Виктор Харлампиевич был директором ААНИИ, участником Великой Отечественной войны, заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, почетным работником морского флота, участником пятнадцати полярных экспедиций. После недолгого разговора профессор согласился принять на кафедру моего друга и неожиданно обратился ко мне с вопросом, не хочу ли и я перейти на эту кафедру. И я, подумав несколько дней, согласился. Так я совершенно случайно стал студентом-океанологом.

– **В жизни много случайностей, которые превращаются в закономерности?**

– Да. Когда после окончания университета я выбирал, что делать дальше, именно профессор Буйницкий еще раз сыграл решающую роль в моей судьбе – позвонил мне и предложил поступить в аспирантуру к профессору Н. А. Лабзовскому в Институт озероведения Академии наук СССР, который только создали в 1971 году. Я был распределен в Морскую гидрографию, мечтал о морских походах, форме, кортике. Как я, океанолог, стану заниматься какими-то озерами?! Но Буйницкий привел убедительный довод в пользу озероведения. Озера могут быть в определенном смысле моделью океана. Одна Ладога чего стоит, в этом озере есть почти все, что и в океане, за малым исключением, конечно. Здесь можно исследовать закономерности различных явлений, ха-

рактерные и для океана. В конце 1970-х годов была даже подпрограмма «Озеро как модель океана» в рамках крупной океанской программы «Разрезы».

– **И Вы не разочаровались в своем выборе?**

– В 70-х годах прошлого века развитию озероведения придавалось большое значение. Возглавлял тогда институт знаменитый географ академик С. В. Колесник. Его сменил известный гидрохимик член-корреспондент РАН О. А. Алекин, вслед за ним – выдающийся полярник академик А. Ф. Трешников. Мои дела в институте складывались успешно, я даже несколько месяцев поработал в Канаде на Великих озерах, побывал по работе в Австрии, ГДР. В конце 1970-х годов мы обладали гораздо большими материальными возможностями для исследований. У нас было собственное судно, а у канадцев – общее для нескольких организаций, и время работы на нем ограничивалось. По количеству и качеству стандартных приборов они, конечно, были богаче. Но русская смекалка никогда не подводила. У нас благодаря умельцам-изобретателям были такие приборы, каких и на Западе не видели. Что меня больше всего поразило в Канаде и Австрии, так это совершенно свободный доступ к научной литературе. И, конечно, то, что коллеги пользовались компьютерами и поисковыми системами. По возвращении я написал первую свою книгу «Динамика озер».

– **А сколько всего Вы написали работ?**

– Если считать и авторские и написанные в соавторстве, то получается 380 научных работ, несколько книг и большое количество научных статей в сборниках. Из них 120 работ по исследованию экосистем прибрежных зон морей и озер, 14 монографий и сборников трудов, в которых я был автором или редактором.

– **С кем-нибудь еще из знаменитых людей приходилось встречаться?**

– Счастливый случай свел меня сразу с двумя известными полярниками. Не знаю, юношеская отвага, нахальство или что-то еще побудило нас, когда мы с товарищем по кафедре океанологии на свой страх и риск, выписав командировку, отправились в Москву к прославленному главе гидрометеослужбы, полярному

исследователю, академику, Герою Советского Союза Е. К. Федорову. Ни много ни мало, мы решили попросить у него корабль для проведения практик студентов ЛГУ. На втором курсе студенты на практике ходили на яхтах по Финскому заливу и мечтали, как на большом белом корабле будут бороздить воды океана. Федоров принял нас, выслушал и строго сказал: «Начинать надо с черного хлеба, а не с белых лайнеров». И добавил, что сначала нужно походить на малых судах, хлебнуть трудностей, а уж потом мечтать о больших кораблях. Но что интересно, на следующий учебный год океанологи ЛГУ вышли в море на судах ленинградского Арктического и Антарктического НИИ.

– **Это он помог, как Вы думаете?**

– Не знаю, случайность это или нет. Похожая история произошла уже в Институте озераведения. Свое судно у нас хотя и было, но уж очень маленькое и старое, а планов – громадьё. И руководство посоветовало мне обратиться в Отдел морских экспедиционных работ АН СССР, который возглавлял контр-адмирал, дважды Герой Советского Союза, великий полярный исследователь И. Д. Папанин. Пришел я к нему на прием, доложил о наших грандиозных планах, а он в ответ лишь сказал помощникам: «Помогите мальчику». «Мальчику», кстати, тогда было уже 29 лет. И всего через два-три года мы получили новое научно-исследовательское судно «Талан», которое было изготовлено в Сретенске, в Хабаровском крае, и приваренным к борту большого судна доставлено в Ленинград в Институт озераведения. Оно больше 30 лет ходило по Ладоге, а несколько лет назад было списано. К сожалению, в настоящее время такое обеспечение науки невозможно. Всем судам, которые используются на внутренних водоемах (Белом, Черном, Азовском морях, крупных озерах), больше 30 лет, и если сегодня решать задачу обновления флота для внутренних водоемов, то нас ожидают печальные перспективы...

– **А как же мечты про океан?**

– Евгений Константинович Федоров, безусловно, был прав – сначала «черный хлеб». Чтобы изучить, понять и описать большую сложную систему, начинать нужно с малого. А по океанам я все же действительно походил. Сначала матросом на рыбацком судне по Атлантическому океану, а затем в Атлантике и Арктике на научно-исследовательском судне ААНИИ «Профессор Зубов». Довелось поработать и в Тихом океане, на Гавайских островах, на Белом и Балтийском морях и на многих крупных озерах мира, которые так же интересны, как океаны.

– **А в Петрозаводске как Вы оказались?**

– В Ленинграде я успешно продвигался по служебной лестнице. Был младшим научным сотрудником, потом старшим, какое-то время исполнял обязанности заведующего лабораторией, защитил кандидатскую диссертацию. Но подспудно возникло желание все изменить, поработать самостоятельно, сделать что-то самостоятельно. Новый толчок часто нужен в науке, нужны новые условия, впечатления. Мы вели совместные проекты с петрозаводскими коллегами П. М. Бояриновым, М. П. Петровым и другими. В начале 1988 года они к нам приехали на защиту кандидатской диссертации П. М. Бояриновым и предложили принять участие в выборах заведующего Отделом водных проблем Карельского филиала АН СССР. Съездил «на разведку». Коллектив мне понравился, у отдела имелись небольшие суда «Посейдон» и «Нептун», работали они уже в новом здании. Я выиграл конкурс из четырех участников и стал заведующим отделом.

В отделе трудились энергичные, квалифицированные специалисты – известные гидрологи В. А. Фрейндлинг, В. Х. Лифшиц, отличные биологи З. С. Кауфман, И. В. Помазовская, сильные гидрохимики Г. П. Пирожкова, А. В. Сабылина, Е. П. Васильева, П. А. Лозовик, гидрогеологи И. К. Поленов, А. В. Иешина, М. А. Богачев и многие другие. Комплексные исследования они вели в Карелии, Архангельской и Вологодской областях. Сами создавали уникальные приборы. Мы подали заявку на приобретение нового научно-исследовательского судна и, как это ни странно для перестроечного времени, получили его. Называлось оно «Эколог», мы ходим на нем и сегодня по Белому и Балтийскому морям, Ладоге и Онеге.

В Петрозаводске целый 1988 год жил в общепитии без семьи, а через год, когда получил квартиру, ко мне переехала семья. В Ленинграде-Питере оставались связи, обустроенный быт, друзья, но я не жалею о том, что сделал. В Петрозаводске открывались новые возможности. Многое, что задумал, удалось реализовать.

Должен отметить замечательную творческую атмосферу в Отделении океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР, которое возглавлял академик Л. М. Бреховских. После двух моих выступлений на Бюро отделения, комплексной проверки и содействия руководства Карельского филиала АН СССР во главе с И. М. Нестеренко в 1991 году был создан Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. А Карельский научный центр РАН стал возглавлять А. Ф. Титов.

– **Расскажите об этом поподробнее.**

– Институт озероведения был создан в 1971 году и сразу стал ведущим в мире. Он решал очень серьезные задачи по изучению озер всей страны, а их немало – около 2,8 млн. Помню, в 1983 году я пришел к директору Института озероведения А. Ф. Трешникову, принес договор с финнами на исследование озер. А он говорит: – Ты на Севане был? – Я ответил: – Да. – А на Байкале? – Тоже был. – А на Балхаше? Если нет, так давай сначала там поработай, а потом с финнами потрудимся.

На Севане тогда для нужд энергетики уровень озера понизили на 18 метров, отчего качество воды резко ухудшилось, на глазах исчезала форель – знаменитый ишхан. Вместе с океанологами и многими соисполнителями из СССР, с моими коллегами и друзьями Л. В. Зайцевым, Г. А. Плуталовым, М. А. Науменко и другими на основании исследований мы предложили поднять уровень озера на шесть метров за счет переброски вод нескольких рек, Куры в том числе. Этот проект мы разрабатывали с командой специалистов по математическому моделированию, возглавляемой будущим академиком А. С. Саркисяном, с которым мне посчастливилось познакомиться. У нас были очень большие планы, и о них институту предоставили возможность доложить на заседаниях нашего академического отделения. Большая честь для молодого директора маленького института из Петрозаводска, к тому же кандидата наук. Докторскую диссертацию по своей любимой теме «Гидродинамика озер» я защитил позже, в 1991 году, на географическом факультете МГУ. Но наступили трудные времена. Однако, поскольку мы находились далеко от Москвы и приходилось рассчитывать только на себя, думаю, это нам и помогло. У нас были хоздоговоры, они давали 30–40 процентов бюджета. Поддерживало и международное сотрудничество. С появлением в 1990-е годы в Санкт-Петербурге по инициативе академика К. Я. Кондратьева и профессора А. Иоханнесена из Бергена Международного научного центра дистанционных методов и окружающей среды имени Нансена возникло множество международных проектов. Не могу не отметить большую роль, которую сыграли в моей научной судьбе академик К. Я. Кондратьев и его коллеги Д. В. Поздняков и Л. П. Бобылев. Мы научились зарабатывать гранты, а не ждать помощи из Москвы. Благодаря содействию таких центров, как Нансеновский, молодые ученые остались работать в России, а не поехали искать счастья за границей. А в последние двадцать лет нам повезло сотрудни-

чать с сильными учеными из Санкт-Петербургского института экономики и математики РАН: с проф. Л. А. Руховцом, В. В. Меншуткиным, командой академика А. П. Лисицына из ИО РАН, сотрудниками ИВП РАН чл.-корр. РАН Ю. С. Долотовым, В. Н. Зыряновым, замечательными специалистами Института вычислительной математики РАН А. С. Саркисяном, В. П. Дымниковым и многими моими коллегами – А. Ю. Тержевиком, П. В. Дружининым и др. Мы применяли математические модели, системный подход к изучению социо-эколого-экономических проблем для Белого моря и его водосбора, давали сценарные прогнозы развития их систем при разных климатических и антропогенных воздействиях; с помощью созданных моделей и длительных комплексных наблюдений создали экспертные системы с использованием методов теории искусственного интеллекта. Вместе с коллегами из ИНОЗ РАН оценили возможность восстановления Ладожского и Онежского озера при изменении климата и экономической деятельности. Эти знания послужили основой разработки проектов законов об охране ресурсов этих озер, которые мы представляли вместе с академиком В. А. Румянцевым в Госдуме и Совете Федерации РФ. Вместе с финскими исследователями за 20 лет мы нашли много новых участков, богатых подземными водами, для решения проблем питьевого водоснабжения, более 20 лет круглый год, в том числе и зимой, мы ведем уникальные исследования на малых озерах. В последние годы вместе с коллегами из Швейцарии, Германии, Франции, Швеции и других стран мы впервые провели уникальные исследования «жизни подо льдом» Онежского озера.

– **Чего ожидаете в перспективе?**

– Конечно, небольшому институту, находящемуся достаточно далеко от Москвы, трудно в одиночку проводить значительные, масштабные исследования, но благодаря грантам, тесному сотрудничеству с сильными коллегами из ведущих институтов России и зарубежных стран мы участвуем в совместных исследованиях крупнейших европейских озер – Ладожского и Онежского, а также Белого моря, используя его как полигон для создания алгоритмов исследования арктических морей. У нас нет возможности приглашать на работу крупных отечественных и зарубежных ученых, но были совместные проекты с математиками и океанологами из Москвы, Санкт-Петербурга, Швеции, Финляндии, Канады, Германии, а теперь и Индии, Китая. Результатом совместных фундаментальных исследований стали книги, изданные в ведущем научном издатель-

стве мира «Springer», такие как «Lake Ladoga and Onego: Great European Lakes», «Strongly nonlinear Internal waves in lakes», «White Sea: Its Marine environment and Ecosystem dynamics influenced by global change», написанная нами вместе с коллегами из Петербурга. Гордимся мы и книгами «Водные ресурсы и проблема питьевого водоснабжения», «Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем Великих озер России», «Озера Карелии» – в последней мы обобщили наши знания, собранные за последние 50 лет, о разнообразных озерах Карелии.

– **Как Вы считаете, все складывается хорошо?**

– Если говорить о моей научной судьбе, то в целом да. Я не жалею, что изучаю озера, водные ресурсы, а не океанские просторы и глубины. Ведь если не просто мечтать о них, а действовать, то многое получается. Например, в начале 2000 годов в течение нескольких лет в качестве эксперта по гидрофизике прибрежных зон мне довелось поработать с академиком В. Г. Бондуrom на Гаванских островах. Но за открытиями вовсе не обязательно идти в океан – новые знания, открытия нас ждут и при исследовании морей и озер.

Многому из того, что достиг в науке, я обязан своим коллегам в разных институтах и университетах нашей и ряда других стран, с которыми сотрудничал многие годы. И, конечно, я благодарен всем моим коллегам из ИВПС КарНЦ РАН, с которыми трудился и продолжаю работать сейчас, а также коллегам из институтов теперь уже ФИЦ «Карельский научный центр РАН».

– **Что пожелаете молодежи, коллегам?**

– Конечно, надо не только мечтать, желательно о серьезном, а действовать, несмотря ни на что, иногда и вопреки обстоятельствам. Надо всегда желать большего, ставить серьезные цели и стремиться их достичь. И постоянно, всю жизнь учиться. Ваши знания – это то, чего вы стоите. Надо всегда следовать принципу, что дело на безделье не меняют. Следуйте этому, и тогда сбудутся ваши мечты.

А я мечтаю, чтобы молодежь стремилась в науку, познавать, открывать новое, мечтаю о том, чтобы была восстановлена Великая Академия Наук России как научная организация, которую уважают во всем мире.

*По материалам изданий
«Поиск», «Ученые записки ПетрГУ»,
«Водные ресурсы»*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам 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 представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); двуязычные таблицы (на русском и английском языках); рисунки; подписи к рисункам на русском и английском языках.

Сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (с указанием почтового индекса) на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом библиографического описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ при первичной подаче материала в редакцию вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в формате TIF (*.TIF) или JPG. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указанием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, элек-

* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

тронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicis* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические описания русскоязычных работ даются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать ее. Описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатных онлайн-сервисов транслитерации, вариант BSI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

(а) – электронная микрофотография кварца; (б) – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; (в) – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

(а) – electron microphotograph of the quartz sample; (б) – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; (в) – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

References:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. *Zhurn. obshh. biol.* [Biol. Bull. Reviews]. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi: 10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf.* (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. Hidrogeokhimicheskie 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.

References:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optiko-elektronnyi apparat [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. Elektron. b-ki [Digital library]. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Demografija. Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

References:

Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

No. 4, 2020

“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY”

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva. CASPIAN SEA LEVEL AS AN INDICATOR OF LARGE-SCALE MOISTURE CYCLING IN THE OCEAN-ATMOSPHERE-LAND SYSTEM 5

A. V. Tolstikov, N. E. Galakhina, R. E. Zdorovenov. HYDROPHYSICAL AND HYDROCHEMICAL STUDIES IN THE KEM' RIVER ESTUARY IN SEPTEMBER 2019 21

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

G. T. Frumin, N. A. Malysheva. WATER QUALITY CHANGES IN LAKE PSKOVSKOE (2000–2018) 32

A. V. Leonov, M. V. Zobkova. BOD KINETIC PARAMETER VALUES FROM LONG-TERM EXPERIMENTS (WITH DIFFERENT INTEGRATED WATER SAMPLES FROM THE CENTRAL PART OF LAKE ONEGO). 40

P. A. Lozovik, N. V. Kulik, N. A. Efremenko. LITHOPHILE ELEMENTS AND HEAVY METALS IN LAKE ONEGO: SOURCES, CONCENTRATIONS AND TRANSFORMATION. 62

Z. I. Slukovskii, V. A. Dauvalter. FEATURES OF Pb, Sb, Cd ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF SMALL LAKES IN THE SOUTH OF THE REPUBLIC OF KARELIA 75

HYDROBIOLOGY

Yu. V. Krylova, E. A. Kurashov, A. G. Rusanov. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPONENT COMPOSITION OF THE LOW MOLECULAR WEIGHT METABOLOME OF WATER SMARTWEED (*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) DELARBRE) FROM DIVERSE HABITATS IN LAKE LADOGA 95

D. Yu. Karnaukhov, E. A. Kurashov. ON NIGHTTIME VERTICAL MIGRATIONS OF AMPHIPODS IN LAKE LADOGA. 115

RESEARCH METHODS

Sh. R. Pozdnyakov, R. R. Shagidullin, S. A. Kondratyev, A. Yu. Bryukhanov, M. V. Shmakova, N. S. Oblomkova, A. T. Gorshkova, D. V. Ivanov, Yu. V. Gorbunova, O. N. Urbanova, N. V. Bortnikova. INVENTORY OF THE SOURCES OF EXTERNAL MAN-MADE LOAD ON KUIBYSHEVSKOE STORAGE RESERVOIR 125

T. Yu. Vyruchalkina. DEVELOPMENT OF A DIGITAL ELEVATION MODEL OF KARA-BOGAZ-GOL BAY 139

DATES AND ANNIVERSARIES

Nikolai N. Filatov (on the 75th anniversary) 145

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 155

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 4, 2020

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 23.04.2020. Дата выхода 30.04.2020. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 15,8. Усл. печ. л. 18,8.
Тираж 150 экз. Заказ 604. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50