

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр  
Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

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

№ 9, 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

# **TRANSACTIONS**

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

No. 9, 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

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

## ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.551:551.55

### РЕАКЦИЯ МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА НА ВЕТРОВУЮ НАГРУЗКУ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ (ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА 3D-МОДЕЛИ)

**И. С. Зверев, Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова, Н. И. Пальшин, С. Р. Богданов, Г. Г. Гавриленко, С. Ю. Волков, Т. В. Ефремова, С. Д. Голосов, А. Ю. Тержевик**

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

По результатам численных расчетов на трехмерной гидродинамической модели изучена реакция мелководного озера на ветровую нагрузку в период открытой воды. Атмосферное воздействие на озеро задано по данным реанализа ERA5. Проанализированы поля течений и температуры воды для периода с мая по декабрь при чередующихся недельных интервалах штиля и действия ветра с постоянной скоростью 3 м/с (первая и третья недели месяца – западный и восточный ветер соответственно, вторая и четвертая – штиль). Модельный расчет показал, что этап весенне-летнего нагревания озера продолжался с начала мая до середины августа. Периоды обострения и ослабления стратификации чередовались на фоне усиления ветровой нагрузки и изменения температуры воздуха. С середины августа озеро охлаждалось в состоянии гомотермии. Согласно модельным расчетам, устойчивая циркуляция формируется в озере уже в первые сутки действия ветра. Во вторые и третьи сутки скорости течений увеличиваются, достигая максимума (0,05–0,15 м/с), и практически не меняются на протяжении следующих 4–7 суток действия ветра. При штиле скорости течений затухают в течение 2–3 суток. При гомотермии ветровая циркуляция охватывает всю водную толщу, скорости течений больше, чем при стратификации. В периоды стратификации под действием ветра происходит формирование поверхностного перемешанного слоя, толщина которого достигает 3–4 м к седьмым суткам ветровой нагрузки. Скорости течений в перемешанном слое заметно больше, чем под термоклином. К концу первых суток штиля стратификация начинает восстанавливаться. Чередование периодов действия ветра и штиля на этапе весенне-летнего нагревания озера способствует накоплению тепла в поверхностных слоях водной толщи и передаче его в гипolimнион, а затем в донные отложения. Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по температуре воды и скоростям течений в озере показывает хорошее соответствие.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** бореальное озеро; период открытой воды; 3D-модель, течения; температура воды; летняя стратификация.

**I. S. Zverev, R. E. Zdrovennov, G. E. Zdrovennova, N. I. Palshin, S. R. Bogdanov, G. G. Gavrilenko, S. Yu. Volkov, T. V. Efremova, S. D. Golosov, A. Yu. Terzhevnik. RESPONSE OF A SHALLOW LAKE TO WIND LOAD DURING THE OPEN WATER PERIOD (3D NUMERICAL EXPERIMENTS)**

Based on the results of numerical calculations on a three-dimensional hydrodynamic model, the response of a shallow lake to wind action during the open water period was studied. The estimate of the atmospheric impact on the lake is based on ERA5 re-analysis data. The fields of currents and water temperature are analyzed for the period from May to December with alternating weekly intervals of calm and wind action at a constant speed of 3 m/s (the first and third weeks of the month are west and east winds, respectively, the second and fourth are calm). The model calculations showed that the spring-summer heating stage in the lake lasted from early May to mid-August. The periods of strong and weak stratification alternated against the background of increased wind load and changes in air temperature. From mid-August onwards the lake cooled down in a state of homothermia. According to the model calculations, stable circulation is formed in the lake already on the first day of the wind. On the second and third days, the current velocities increased reaching a maximum of 0.05–0.15 m/s, and changed very little during the next 4–7 days of wind. Under calm conditions, the currents decayed within 2–3 days. With homothermy, wind circulation engaged the entire water column, with currents greater than during stratification. During periods of stratification under the influence of wind, a surface mixed layer was formed, the thickness of which reached 3–4 m by the seventh day of the wind load. The velocities of currents in the mixed layer were noticeably higher than under the thermocline. In the first days of the calm, stratification began to recover. The alternation of periods of wind and calm at the stage of spring-summer heating of the lake contributed to the accumulation of heat in the surface layers of the water column and its transfer to the hypolimnion, and then to the sediments. Simulated and observed data on water temperature and current velocities in the lake showed good agreement.

**Key words:** boreal lake; open water season; 3D model; currents; water temperature; summer stratification.

---

## **Введение**

Термогидродинамические процессы играют важнейшую роль в функционировании озерных экосистем, определяя устойчивость водной толщи, особенности кислородного режима, перенос веществ, тепло- и массообмен с атмосферой и донными отложениями [Wagner, Adrian, 2011; Bernhardt et al., 2014]. На фоне наблюдаемых изменений климата изучение термогидродинамики озер приобретает особое значение, поскольку прогнозируемые сдвиги в сроках термических этапов и режиме перемешивания [Kirillin, 2010] могут привести к необратимым перестройкам в озерных экосистемах.

В рамках исследований по государственной теме «Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Процессы переноса и перемешивания в годовом цикле» для изучения особенностей гидродинамики небольших водоемов суши используется трех-

мерная модель мелкого моря [Ибраев, 2008], адаптированная для озер.

В качестве модельного водоема выбрано небольшое мелководное оз. Вендюрское (средняя и максимальная глубина 5,3 и 13,4 м соответственно), расположенное в южной части Карелии. Оно является типичным представителем озер ледникового происхождения, широко распространенных на территории Карелии [Терзhevnik и др., 2010], поэтому результаты моделирования для этого озера могут быть применены к подобным ему по морфометрическим особенностям и трофическому статусу водоемам. Информация по озеру Вендюрскому приведена в работах [Терзhevnik и др., 2010; Зdrovennova и др., 2017].

Цель работы заключается в выявлении основных закономерностей реакции мелководного озера на ветровое воздействие в период открытой воды: в количественной оценке времени выхода поля ветровых течений на квазистационарный режим, релаксации гидро-

динамической структуры озера после снятия ветровой нагрузки, а также в оценке влияния термической структуры и ее отклика на ветровые течения.

### **Материалы и методы. Описание модели**

Циркуляция водной массы в озере произвольной геометрии описывается 3-мерными уравнениями термогидродинамики. Поверхность раздела воздух-вода свободная, воспроизводится пространственная изменчивость среднего уровня озера. Взаимодействие атмосферы и озера описывается через потоки импульса, тепла и влаги. При возникновении условий, благоприятных для формирования льда, включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, намерзание, таяние) во льду. При этом потоки импульса, тепла и влаги через границу атмосфера-вода меняются на потоки через границы атмосфера-лед и лед-вода. В модели явным образом описываются потоки воды через боковые границы (приток и сток рек, обмен через возможные промежуточные водотоки) и поверхность раздела воздух-вода (испарение, осадки). Изначально модель была разработана для описания термогидродинамических процессов в Каспийском море. В процессе адаптации модели к озерным условиям уравнение состояния морской воды было заменено на уравнение состояния слабоминерализованной воды [Chen, Millero, 1986], позволяющее воспроизводить такое важное для пресноводных водоемов явление, как термобар.

Для учета озерной специфики, характерной для относительно мелководных озерных акваторий, модель была дополнена специальными модулями для расчета теплообмена через границу раздела вода-дно [Голосов, Крейман, 1992] и ресуспензии («взмучивания») донных отложений [Мартыанов, Рябченко, 2013].

Кроме того, в «озерную» версию модели включены параметризации пространственно-временной изменчивости прозрачности воды, биомассы и первичной продукции фитопланктона; также учитываются температура и минерализация вод притоков и речной сток [Голосов и др., 2020; Мотовилов и др., 2020].

В таком виде 3D-модель реализуется на вычислительном кластере Карельского научного центра РАН; для интерпретации и анализа результатов расчетов используется графоаналитическая система VisIt [Lawrence..., 2020].

К настоящему моменту «озерная» версия модели успешно применена для воспроизведе-

дения годовой динамики перечисленных выше параметров в больших глубоководных озерах северо-запада России – Ладожском и Онежском [Голосов и др., 2020], большой мелководной Чудско-Псковской озерной системе [Отчет..., 2017] и Куйбышевском водохранилище [Мотовилов и др., 2020], а также для зимнего периода типичного для северо-запада РФ мелководного озера Вендюрского [Зверев и др., 2019].

Для воспроизведения в модели озерной гидротермодинамики качество метеорологической информации имеет критическое значение. Для Вендюрского озера модель ранее была верифицирована и применялась только для условий ледостава [Зверев и др., 2019]. При этом атмосферное воздействие на водоем учитывалось по данным реанализа NCEP/NCAR, в котором пространственное разрешение составляет  $2,5 \times 2,5$  градуса с временным шагом 6 ч. В условиях ледостава атмосферное воздействие не играет такой значительной роли, как в период открытой воды. Поэтому при выполнении настоящей работы для условий открытой воды с целью более качественного описания атмосферного форсинга реанализ NCEP/NCAR был заменен на реанализ ERA 5, имеющий разрешение  $0,25 \times 0,25$  градуса с временным шагом 3 ч (пятое поколение атмосферного реанализа глобального климата ECMWF [Climate...]). Поскольку модель ранее была успешно верифицирована по данным наблюдений на глубоководных и мелководных акваториях других озер [см., например: Зверев и др., 2015; Мотовилов и др., 2020] с использованием реанализа NCEP/NCAR, авторы полагают, что выполненная замена реанализа способна только улучшить качество расчетов для озера Вендюрского в период открытой воды.

Кроме того, в текущую версию модели включена новая параметризация, учитывающая временную деформацию вертикального распределения температуры в донных отложениях, что позволило улучшить качество расчетов теплообмена через границу раздела вода-дно в зимний период. В период открытой воды, когда теплообмен с донными отложениями не играет большой роли в тепловом балансе озера, данная параметризация не оказывает заметного влияния на качество расчетов.

Модельные расчеты для озера Вендюрского проводились с заданием погодных условий для 2004 и 2005 гг. Результаты расчетов для первого года в анализе не использовались. В данной статье обсуждается термогидродинамика озе-

ра в период открытой воды второго года модельного расчета.

В настоящей статье в ходе модельных экспериментов исследовалась реакция озера на ветровые воздействия. Поэтому, чтобы исключить влияние сезонных колебаний уровня воды, вызываемых половодьями, в модели был установлен нулевой водный баланс, т. е. колебания среднего уровня исключались. В ходе расчетов возникали колебания уровня воды, вызванные только ветровыми воздействиями, но они были незначительными.

Теплопоток через границу вода-дно рассчитывался в соответствии с подходом, изложенным в работе [Голосов, Крейман, 1992], коэффициент экстинкции воды – по данным работы [Гавриленко и др., 2015]. Расчеты выполнялись со следующими параметрами: шаг по горизонтали – 80 м, по вертикали – 1 м, шаг по времени – 30 сек. В узлах расчетной сетки получены значения полей скорости течений и температуры воды при чередующихся недельных интервалах штиля и действия ветра с постоянной

скоростью 3 м/с. В течение первой и третьей недели месяца задавался западный и восточный ветер соответственно, дующий с постоянной скоростью 3 м/с; вторая и четвертая неделя каждого месяца – штиль. Проведено качественное сравнение результатов численных экспериментов с данными натурных измерений температуры и течений в озере Вендюрском в период открытой воды 2007–2019 гг. [Zdrovennov et al., 2013; Здровеннова и др., 2017].

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 показана временная динамика температуры поверхностного и придонного слоев на центральной вертикали оз. Вендюрского в период с 10 апреля по 31 декабря 2005 г. по данным численных расчетов, а также приведены периоды действия ветра.

Окончание периода ледостава (1 мая) и его начало (12 декабря) хорошо согласуются с датами этих явлений на озере Вендюрском.

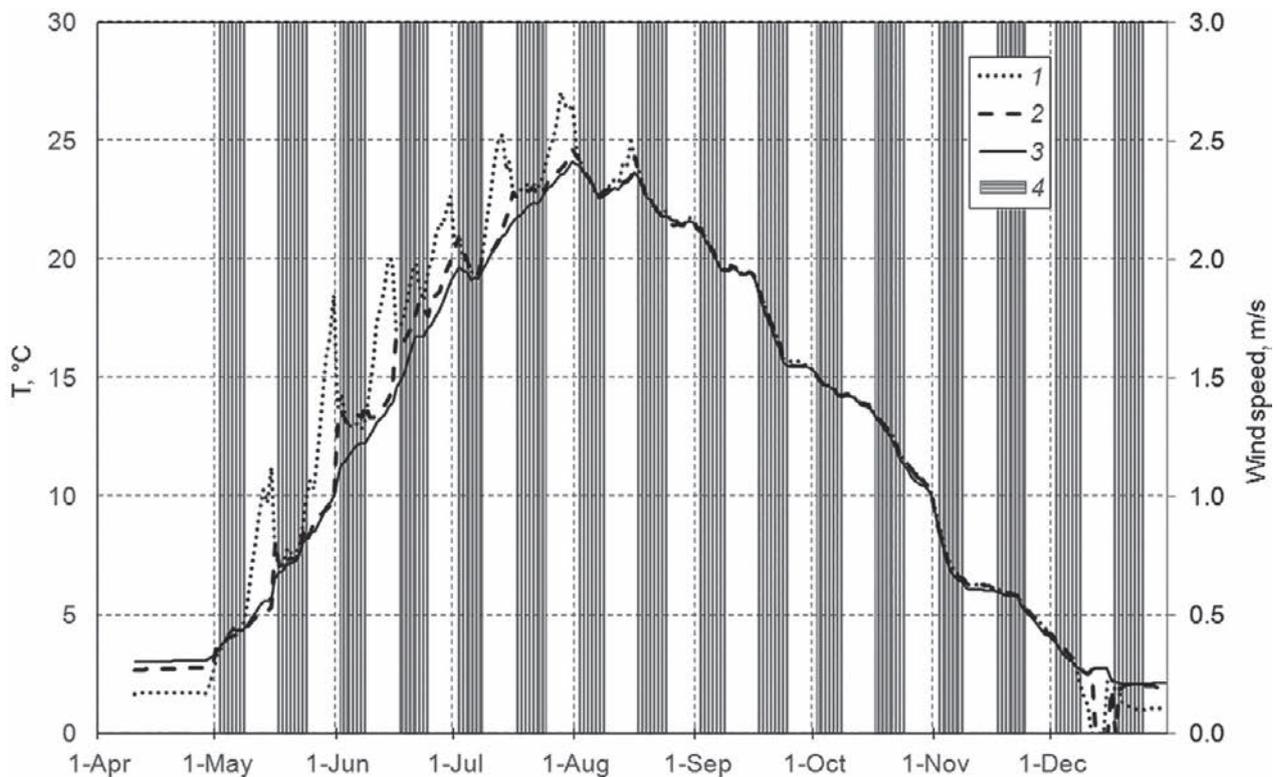


Рис. 1. Динамика температуры воды поверхностного слоя (1) и на глубинах 5 (2) и 11 (3) м в центральной глубоководной части озера Вендюрского в период с 1 апреля по 31 декабря 2005 г. Модельный расчет. 4 – периоды действия ветра

Fig. 1. Dynamics of the water temperature of the surface layer (1) and at depths of 5 m (2) and 11 m (3) in the central deep part of Lake Vendyurskoe from April 1 to December 31, 2005. Model calculation. 4 – periods of wind action

По многолетним данным известно, что лед встает на озере в период с 7 ноября по 12 декабря, а очищение ото льда происходит с 29 апреля по 19 мая [Zdorovenov et al., 2013].

Согласно модельному расчету с учетом погодных условий 2005 г., сезонное повышение температуры водной толщи озера Вендюрского происходило в период с начала мая до середины августа (рис. 1). При этом периоды слабо выраженной стратификации (с разницей температур поверхностного и придонного слоев не более 5–7 °С) сменялись периодами перемешивания водной толщи под действием ветровой нагрузки.

В моменты полного перемешивания озера скачкообразно увеличивалась придонная температура, а поверхностная – понижалась, то есть тепло, накопленное в поверхностных слоях озера, переходило в придонные слои. Годовой максимум температуры придонного слоя центральной глубоководной котловины озера +24,8 °С был достигнут 16 августа. С середины августа водная толща охлаждалась в состоянии гомотермии.

По данным многолетних измерений температуры на центральной вертикали озера Вендюрского с использованием автономных станций (термокос, оснащенных температурными датчиками RBR Ltd., точность 0,002 °С, разрешение < 0,00005 °С) [Здоровеннова и др., 2017] установлено, что на этапе весенне-летнего нагревания водная толща озера периодически находится в состоянии слабой стратификации, сменяющейся гомотермией при усилении ветровой нагрузки и резком падении температуры воздуха (при прохождении циклонов); годовой максимум температуры придонного слоя на центральной вертикали достигает 17–20 °С; этап осеннего охлаждения озера начинается в разные годы с 5 по 28 августа. Таким образом, модель адекватно воспроизводит эволюцию термической структуры озера Вендюрского в период открытой воды.

Модельный расчет показал, что максимальные скорости течений в озере в период открытой воды достигают 0,07–0,15 м/с при действии ветра со скоростью 3 м/с в течение недели. Натурные измерения скоростей течений в озере проводились в летние сезоны 2017–2019 гг. в течение 2–4 месяцев с дискретностью пять минут на автономных станциях с использованием измерителей течений Alec Electronics (Япония, точность ±1 см/с и ±2°, разрешающая способность 0,02 см/с и 0,01°), закрепленных на глубинах 2–9 м.

Анализ данных показал, что максимальные скорости течений на всех станциях

и на всех горизонтах не превышали 0,2 м/с; в среднем скорости течений составляли 0,02–0,04 м/с, периодически увеличиваясь до 0,10–0,15 м/с на фоне резких перепадов атмосферного давления и усилений ветра [Здоровеннова и др., 2019]. Таким образом, модельные течения хорошо соответствуют измеренным по величине.

Согласно модельным расчетам, устойчивая циркуляция формируется в озере уже к концу первых суток действия ветра, независимо от того, находится водная толща в состоянии гомотермии или стратификации. Во вторые и третьи сутки скорости течений увеличиваются, достигая максимума (0,07–0,15 м/с), и затем практически не меняются на протяжении 4–7 суток. При гомотермии ветровая циркуляция охватывает всю водную толщу, при этом скорости течений больше (рис. 2, 9), чем в период стратификации (рис. 4, 6, 7).

При штиле скорости течений затухают в течение 2–3 суток, при этом в условиях гомотермии (рис. 3) уменьшение скоростей более существенное и быстрое, чем в условиях стратификации (рис. 5, 8). В условиях штиля как при гомотермии, так и при стратификации в поверхностном слое озера толщиной 1–2 м формируются два циклонических вихря (панели (с) на рис. 3, 5, 8). Скорости течений в этих вихрях очень малы, и их возникновение может быть связано с перестройкой поля течений при отсутствии ветровой нагрузки. Топографические особенности котловины озера также могут быть причиной образования этих устойчивых в пространственном отношении вихрей.

В периоды стратификации под действием ветра происходит формирование поверхностного перемешанного слоя, толщина которого достигает 3–4 м; при отключении ветра к концу первых суток штиля стратификация начинает восстанавливаться. При этом скорости течений в перемешанном слое заметно выше, чем в нижележащих слоях озера (панели (d) на рис. 4, 6, 7).

При действии как западного, так и восточного ветра в течение недели, независимо от того, стратифицировано озеро или нет, в его поверхностном слое формируется 3–4 ориентированных поперек озера зоны повышенных скоростей (рис. 2, 4, 6, 7, 9). При действии западного ветра формируется зона нисходящих течений вблизи южного берега озера (панели (d) на рис. 2, 4, 9), при действии восточного ветра такая зона появляется вблизи северного берега озера (рис. 6, d и 7, d).

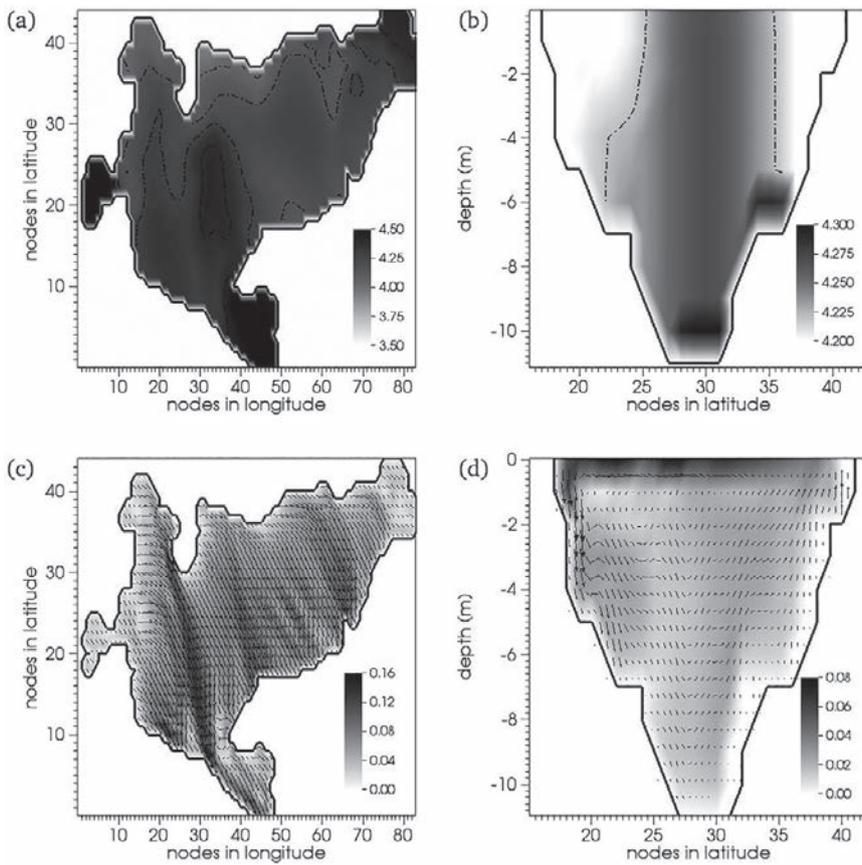


Рис. 2. Здесь и далее: поля температуры (а, б) и скоростей течений (с, д); скорости приведены в м/с, вертикальная скорость на панели (д) увеличена в 80 раз.

8 мая 2005 г. (7-е сутки действия западного ветра, гомотермия) на поверхности озера Вендюрского (а, с) и на сечении поперечного разреза (б, д)

Fig. 2. Here and in Fig. 3–9: The temperature (a, b) and velocity field (c, d); velocity is given in m/s. The vertical velocity component  $w$  on panel (b) is increased 80 times.

May 8, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of the west wind, homothermy) on the surface of Lake Vendyurskoe (a, c) and on the cross section (b, d)

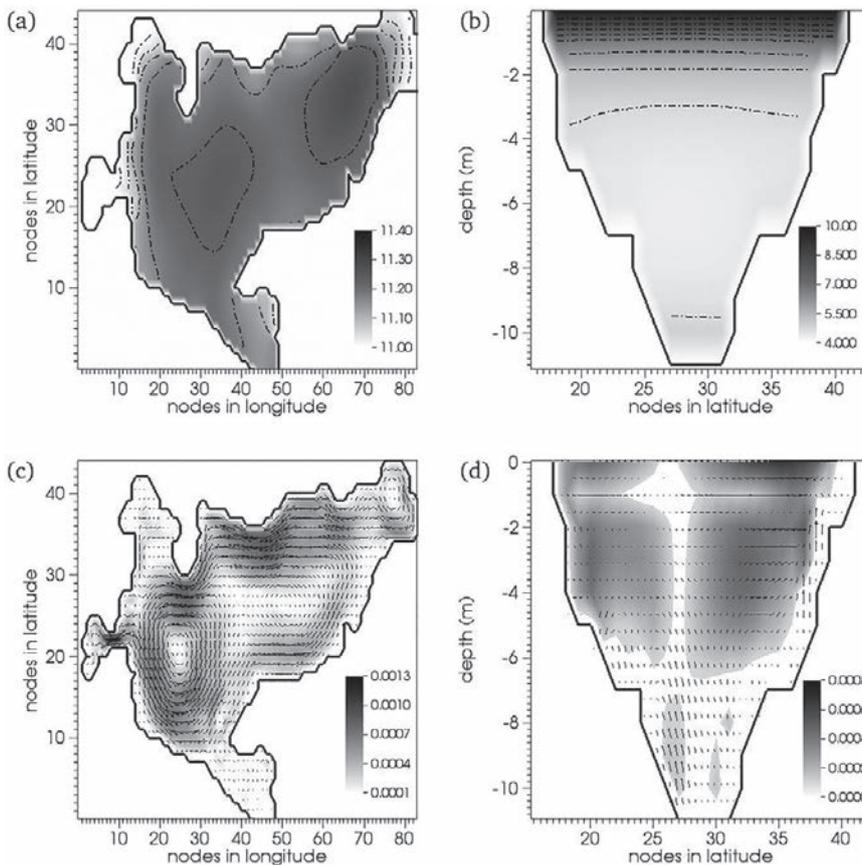


Рис. 3. 16 мая 2005 г. (7-е сутки штиля, стратифицирован верхний 3-м слой водной толщи, ниже – температура однородна)

Fig. 3. May 16, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of calm, the upper 3 m layer of the water column is stratified, below – the temperature is uniform)

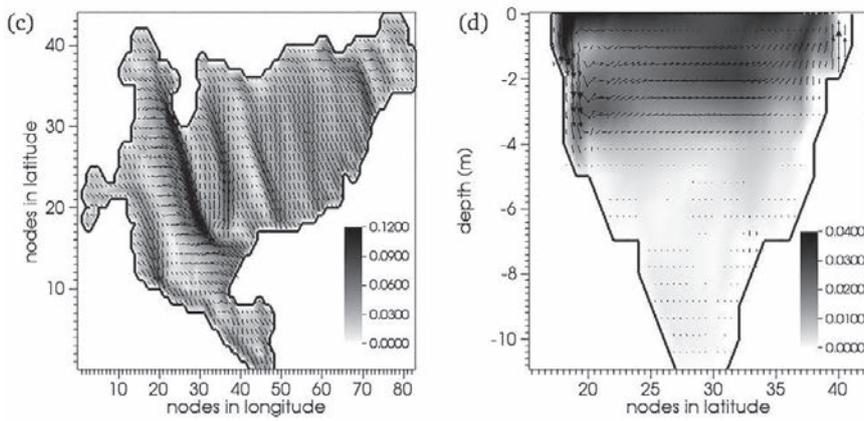
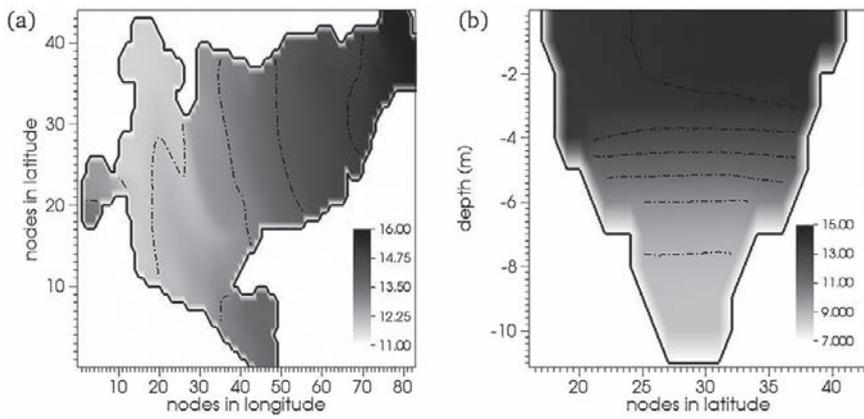


Рис. 4. 8 июня 2005 г. (7-е сутки действия западного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)  
 Fig. 4. June 8, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of the west wind, surface mixed layer 3.5 m)

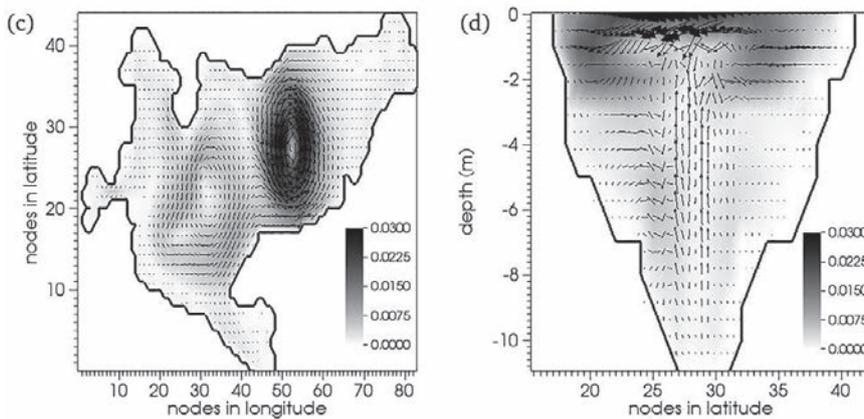
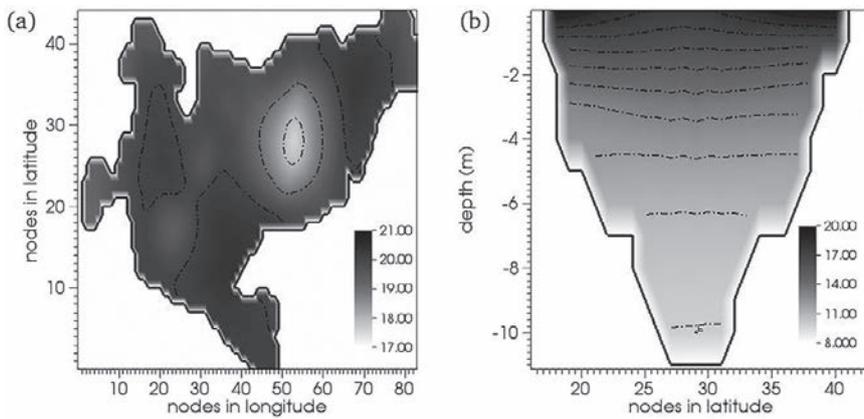


Рис. 5. 16 июня 2005 г. (7-е сутки штиля, водная толща стратифицирована)  
 Fig. 5. June 16, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of calm, the water column is stratified)

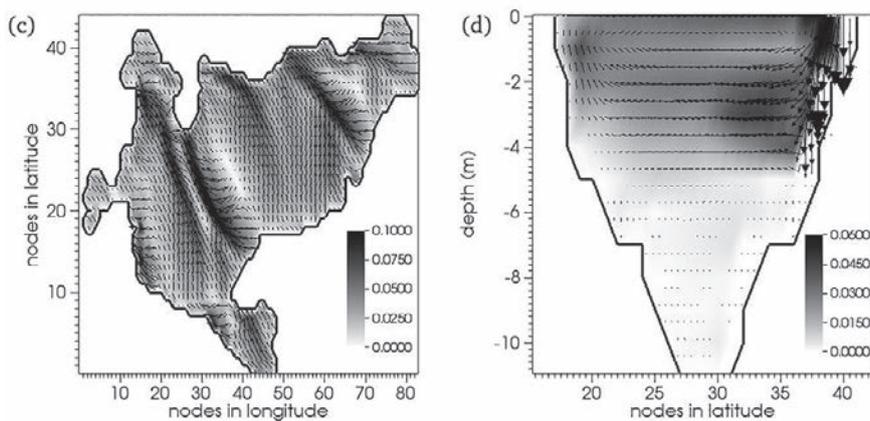
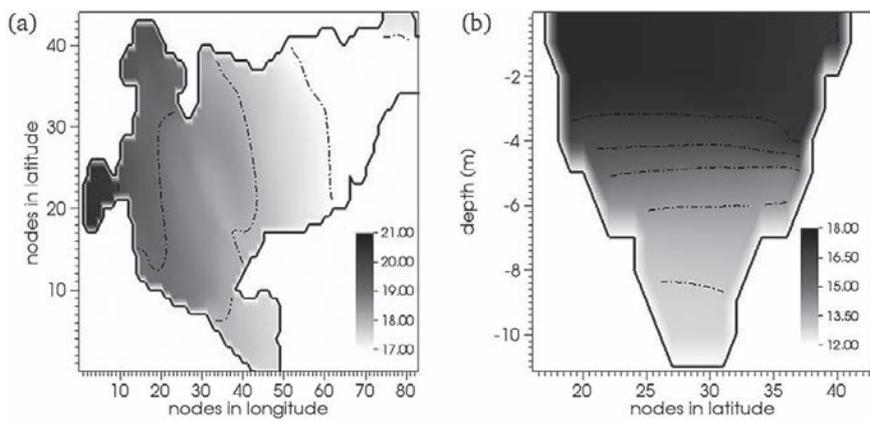


Рис. 6. 24 июня 2005 г. (7-е сутки действия восточного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)  
 Fig. 6. June 24, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of the east wind, surface mixed layer 3.5 m)

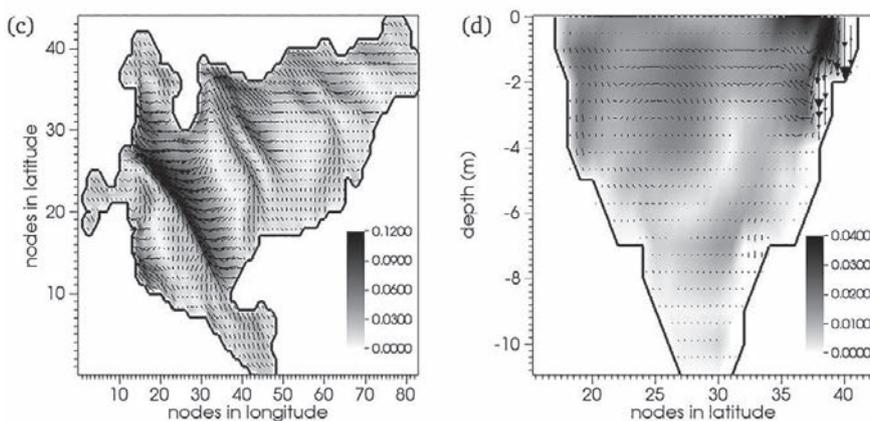
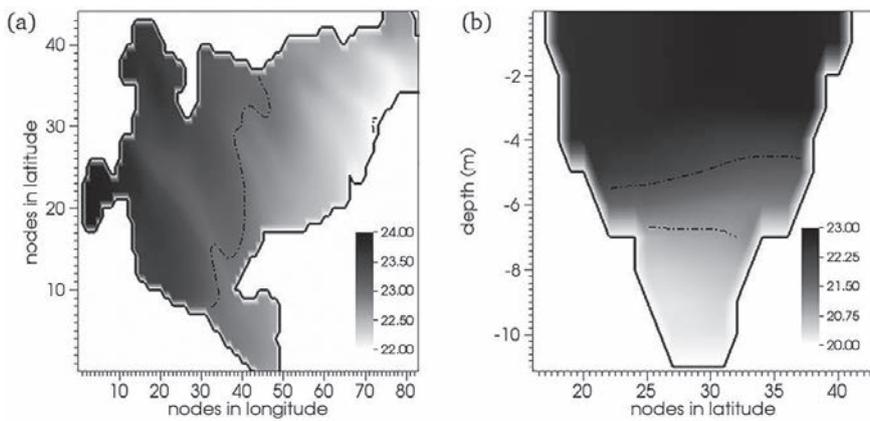


Рис. 7. 24 июля 2005 г. (7-е сутки восточного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)  
 Fig. 7. July 24, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of the east wind, surface mixed layer 3.5 m)

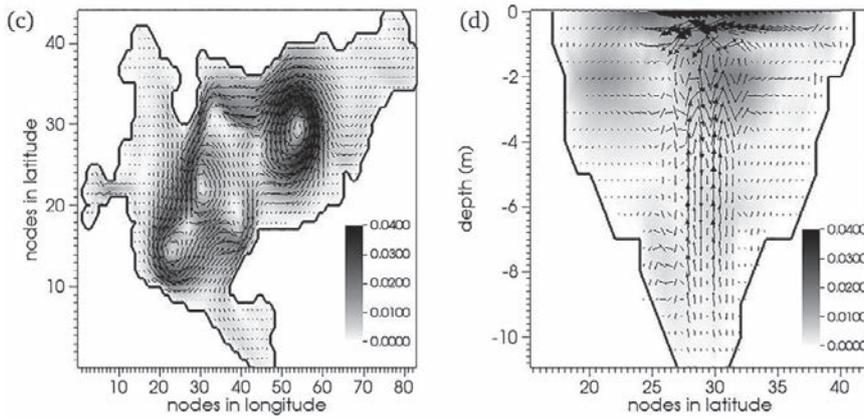
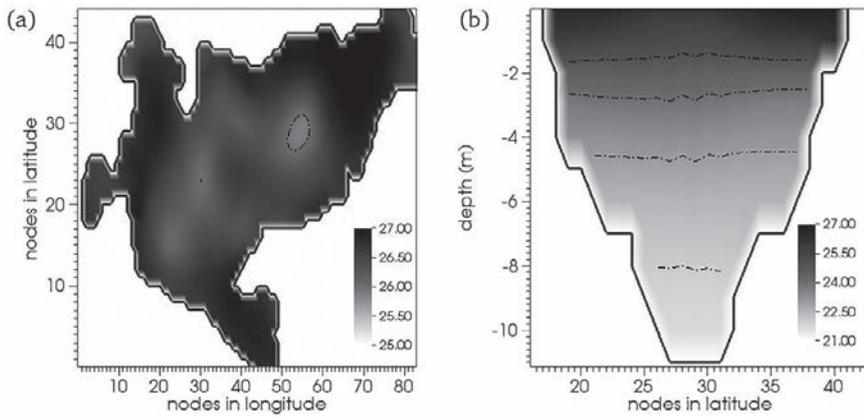


Рис. 8. 1 августа 2005 г. (7-е сутки штиля, водная толща стратифицирована)  
 Fig. 8. August 1, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of calm, the water column is stratified)

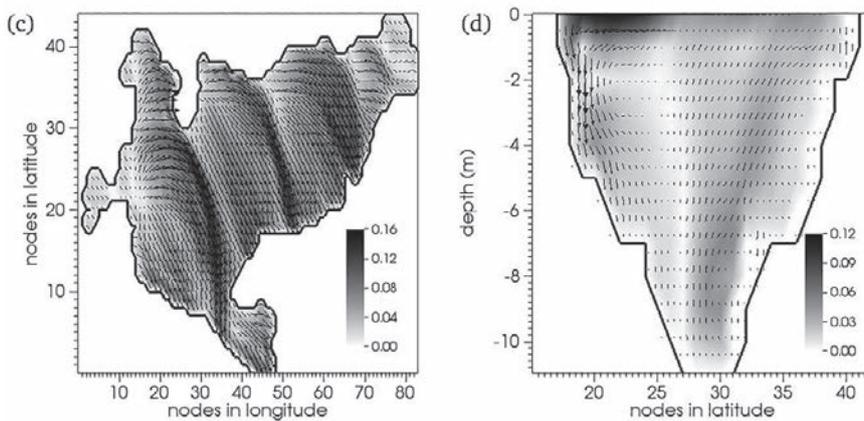
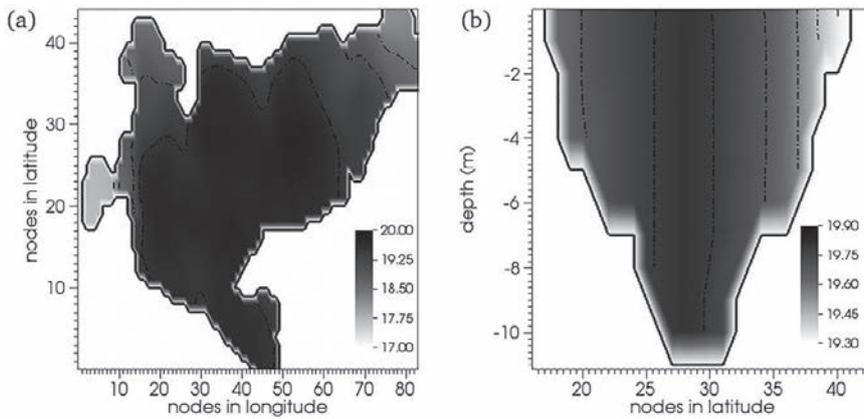


Рис. 9. 8 сентября 2005 г. (7-е сутки действия западного ветра, гомотермия)  
 Fig. 9. September 8, 2005 (the 7<sup>th</sup> day of the west wind, homothermy)

## Заключение

Анализ результатов численных расчетов на 3D-модели позволил выявить основные особенности развития течений в периоды гомотермии и стратификации в небольшом мелководном озере при меняющемся атмосферном воздействии (чередование недельных периодов штиля и действия ветра).

Схемы течений, развивающихся в озере на фоне действия ветра, заметно отличаются в зависимости от того, стратифицирована ли водная толща или находится в состоянии гомотермии. В периоды гомотермии на фоне действия ветра в озере формируется циркуляция, охватывающая всю водную толщу, скорости течений могут достигать 0,15 м/с. В периоды стратификации действие ветра приводит к формированию поверхностного перемешанного слоя толщиной 3–4 м, в котором скорости течений достигают 0,09–0,12 м/с и заметно превышают скорости в нижележащих слоях водной толщи. Согласно модельным расчетам, устойчивая циркуляция формируется в озере уже к концу первых суток действия ветра, независимо от того, находится водная толща в состоянии гомотермии или стратификации. При штиле скорости течений затухают в течение 2–3 суток, при этом в условиях гомотермии уменьшение скоростей более существенное и быстрое, чем в условиях стратификации. Выявлены некоторые характерные особенности течений в поверхностном слое озера, возникающих при действии ветра (поперечные зоны повышенных скоростей, зоны опускания вблизи берегов) и в штилевых условиях (остаточная циркуляция в виде вихрей). Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по температуре воды и скоростям течений в озере показывает хорошее соответствие, что позволяет использовать результаты модельных расчетов при изучении термогидродинамических особенностей мелководного озера в период открытой воды.

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

## Литература

Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Тержевик А. Ю. Пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в мелководном озере в период открытой

воды // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 186–192.

Голосов С. Д., Крейман К. Д. Теплообмен и термическая структура системы вода – донные отложения // Водные ресурсы. 1992. № 6. С. 12–18.

Голосов С. Д., Зверев И. С., Шипунова Е. А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ) // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 166–197.

Зверев И. С., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Волков С. Ю., Гавриленко Г. Г., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Тержевик А. Ю. Моделирование термогидродинамических процессов в мелководном бореальном озере: верификация трехмерной модели // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. С. 5–17. doi: 10.17076/lim1108

Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Распространение термической фронтальной зоны («термобара») в Ладожском озере по результатам моделирования // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Москва, 15–18 сентября 2015 г.). М., 2015. С. 109–111.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Тержевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 6. С. 59–74.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Волков С. Ю., Богданов С. Р., Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Зверев И. С., Здоровеннов Р. Э. Течения в небольшом озере в период открытой воды // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. № 4. С. 277–287.

Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Геос, 2008. 127 с.

Мартыанов С. Д., Рябченко В. А. Воспроизведение взмучивания и переноса донных осадков в Невской губе на основе трехмерной модели циркуляции // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 4. С. 32–43.

Мотовилов Ю. Г., Голосов С. Д., Даценко Ю. С., Зверев И. С., Пуклаков В. В., Фащевская Т. Б. Информационно-моделирующий комплекс для оценки гидроэкологического состояния водохранилищ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 567–578.

Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Научные исследования роли внутренней нагрузки в формировании состояния экосистемы Чудско-Псковского озера и разработка научно обоснованных рекомендаций по улучшению экологического состояния Чудско-Псковского озера в рамках российско-эстонского сотрудничества в области охраны и рационального использования трансграничных водных объектов. ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». Гражданско-правовой договор от 29 мая 2017 г. № 73-НИР/ФЦП – 2017 г.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37(5). С. 568–579.

Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // *Limnol. Oceanogr. Fluids Environ.* 2014. Vol. 4(1). P. 17–33. doi: 10.1215/21573689-2683238

Chen C. T., Millero F. J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. Vol. 31(3). P. 657–662.

Climate Data Store. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (дата обращения: 11.08.2020).

## References

Gavrilenko G. G., Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Terzhevik A. Yu. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka fotosinteticheski aktivnoi solnechnoi radiatsii v melkovodnom ozere v period otkrytoi vody [Spatio-temporal variability of the flux of photosynthetically active solar radiation in a shallow lake during the open water period]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environ. Development]. 2015. No. 3. P. 186–192.

Golosov S. D., Kreiman K. D. Teploobmen i termicheskaya struktura sistemy voda – donnye otlozheniya [Heat exchange and thermal structure of the water-bottom sediments system]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1992. No. 6. P. 12–18.

Golosov S. D., Zverev I. S., Shipunova E. A. Modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov i ekosistem Ladozhskogo i Onezhskogo ozer na osnove 3D-modeli gidrodinamiki vnutrennego morya (MGVM) [Modeling of thermohydrodynamic processes and ecosystems of Lakes Ladoga and Onego based on the 3D model of the hydrodynamics of the inland sea (MGIS)]. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* [The diagnosis and prognosis of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. P. 166–197.

Ibraev R. A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov v Kaspiiskom more [Mathematical modeling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea]. Moscow: Geos, 2008. 127 p.

Mart'yanov S. D., Ryabchenko V. A. Vosproizvedenie vzmuchivaniya i perenosa donnykh osadkov v Nevskoi gube na osnove trekhmernoii modeli tsirkulyatsii [Reproduction of turbidity and transport of bottom sediments in the Neva Bay based on a three-dimensional circulation model]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. and Appl. Hydrophysics]. 2013. Vol. 6, no. 4. P. 32–43.

Motovilov Yu. G., Golosov S. D., Datzenko Yu. S., Zverev I. S., Puklakov V. V., Fashevskaya T. B. Informatsionno-modeliruyushchii kompleks dlya otsenki gidroekologicheskogo sostoyaniya vodokhranilishch [In-

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

Lawrence Livermore National Laboratory. URL: <https://hpc.llnl.gov/software/visualization-software/visit> (дата обращения: 03.09.2020).

Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biol.* 2011. Vol. 56, iss. 10. P. 1949–1961. doi: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovenнова G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 62. P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Поступила в редакцию 13.08.2020

formation and modeling system for assessing the hydroecological state of reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2020. Vol. 47, no. 5. P. 567–578.

Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote po teme: "Nauchnye issledovaniya roli vnutrennei nagruzki v formirovaniy sostoyaniya ekosistemy Chudsko-Pskovskogo ozera i razrabotka nauchno-obosnovannykh rekomendatsii po uluchsheniyu ekologicheskogo sostoyaniya Chudsko-Pskovskogo ozera v ramkakh rossiisko-estonskogo sotrudnichestva v oblasti okhrany i ratsional'nogo ispol'zovaniya transgranichnykh vodnykh ob'ektov. FTsP "Razvitie vodokhozyaistvennogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii v 2012–2020 godakh" Grazhdansko-pravovoi dogovor ot 29 maya 2017 g. № 73-NIR/FTsP – 2017 g. [Report on the research work on the topic: 'Study of internal load role in the formation of the ecosystem state of Lake Peipsi and development of scientifically based recommendations for improving the ecological state of Lake Peipsi in the framework of Russian-Estonian cooperation in the field of protection and rational use of transboundary water bodies'. FTP 'Development of the water management complex of the Russian Federation in 2012–2020'. Civil law contract No. 73-NIR / FTP – 2017 dated May 29, 2017].

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

Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Zverev I. S., Zdorovennov R. E. Tcheniya v nebol'shom ozere v period otkrytoi vody [Currents in a small lake during the open water period]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Eco-geodynamics of Regions]. 2019. No. 4. P. 277–287.

Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Ter-

zhevika Yu. Evolyutsiya temperatury vodnoi tolshchi boreal'nykh ozer na fone izmenenii regional'nogo klimata [Evolution of the temperature of the water column of boreal lakes against the background of changes in the regional climate]. *Izv. RGO* [News RGS]. 2017. Vol. 149, no. 6. P. 59–74.

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. Rasprostranenie termicheskoi frontal'noi zony ("termobara") v Ladozhskom ozere po rezul'tatam modelirovaniya [Distribution of the thermal frontal zone ("thermobar") in Lake Ladoga according to the simulation results]. *Fund. probl. vody i vodnykh resursov: Trudy 4-i Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Fund. probl. of water and water res.: Proceed. 4<sup>th</sup> All-Russ. sci. conf. with int. part.]. (Moscow, Sept. 15–18, 2015). Moscow, 2015. P. 109–111.

Zverev I. S., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E., Bogdanov S. R., Volkov S. Yu., Gavrilenko G. G., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Terzhevnik A. Yu. Modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov v melkovodnom boreal'nom ozere: verifikatsiya trekhmernoi modeli [Modelling of thermodynamics of a shallow boreal lake: 3D model verification]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 9. P. 5–17. doi: 10.17076/lim1108

Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations. *Limnol. Oceanogr.* 2014. Vol. 4(1). P. 17–33. doi: 10.1215/21573689-2683238

Chen C. T., Millero F. J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.* 1986. Vol. 31(3). P. 657–662.

Climate Data Store. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/re-analysis-era5-single-levels?tab=overview> (accessed: 08.08.2020).

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

Lawrence Livermore National Laboratory. URL: <https://hpc.llnl.gov/software/visualization-software/visit> (accessed: 03.09.2020).

Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale. *Freshwat. Biol.* 2011. Vol. 56, iss. 10. P. 1949–1961. doi: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 62. P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Received August 13, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Зверев Илья Сергеевич**

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: [iliazverev@mail.ru](mailto:iliazverev@mail.ru)  
тел.: (8142) 578464

### **Здорovenнов 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](mailto:romga74@gmail.com)  
тел.: (8142) 576381

### **Здорovenнова Галина Эдуардовна**

заведующая 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: [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)  
тел.: (8142) 576381

## CONTRIBUTORS:

### **Zverev, Ilya**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: [iliazverev@mail.ru](mailto:iliazverev@mail.ru)  
tel.: (8142) 578464

### **Zdorovennov, 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](mailto:romga74@gmail.com)  
tel.: (8142) 576381

### **Zdorovennova, Galina**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)  
tel.: (8142) 576381

**Пальшин Николай Иннокентьевич**

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: npalshin@mail.ru  
тел.: (8142) 576381

**Богданов Сергей Рэмович**

ведущий научный сотрудник, д. ф.-м. н., доцент  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

**Гавриленко Галина Геннадиевна**

младший научный сотрудник  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: gg.gavrylenko@gmail.com

**Волков Сергей Юрьевич**

младший научный сотрудник  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: taranarmo@gmail.com

**Ефремова Татьяна Владимировна**

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

**Голосов Сергей Дмитриевич**

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

**Терзевик Аркадий Юрьевич**

ведущий научный сотрудник лаб. гидрофизики, к. т. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: ark1948@list.ru  
тел.: (8142) 578464

**Palshin, Nikolai**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: npalshin@mail.ru  
tel.: (8142) 576381

**Bogdanov, Sergey**

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

**Gavrilenko, Galina**

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

**Volkov, Sergey**

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

**Efremova, Tatyana**

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

**Golosov, Sergey**

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

**Terzhevik, Arkady**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ark1948@list.ru  
tel.: (8142) 578464

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 502.5

### ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ОСТРОВА САМОЙЛОВСКИЙ, ДЕЛЬТА РЕКИ ЛЕНЫ

**А. В. Гузева<sup>1,2</sup>, И. В. Федорова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

<sup>2</sup> Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (ИНОЗ РАН – СПбФИЦ РАН), Россия

Исследованы содержание тяжелых металлов (Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn), а также формы их нахождения в донных отложениях двух озер о. Самойловский (дельта р. Лены), разных по происхождению и гидрологическому режиму. Проведено обобщение геохимических данных для исследуемой территории. Для оценки роли различных фаз-носителей в накоплении тяжелых металлов использовалась схема последовательной экстракции элементов. Все химические анализы выполнены при помощи метода ICP AES. Результаты выявили относительно равномерную динамику поступления исследованных элементов в систему двух озер на протяжении всего периода их существования (около 3 тыс. лет по данным радиоуглеродного анализа). Средние концентрации тяжелых металлов оказались соотносимыми с содержанием в осадках других озер, а также почв острова. Анализ форм тяжелых металлов показал, что элементы накапливаются в донных отложениях преимущественно в устойчивой форме, связанной с кристаллической решеткой первичных и вторичных минералов. Однако гумусовое вещество играет существенную роль в связывании катионов всех металлов в устойчивые комплексные соединения. В наибольшей степени органомфильные свойства проявляют Cu, Pb и Zn. Отмечено, что значимая доля Ni, Cr, Zn и Cu ассоциирована с оксидами Fe и Mn. В подвижных (потенциально биодоступных) формах идентифицированы Zn, Cr, Cu и Mn. Для Mn и Zn показана высокая вероятность вторичного загрязнения вод.

**Ключевые слова:** донные отложения озер; тяжелые металлы; формы тяжелых металлов; о. Самойловский; дельта р. Лены.

### **A. V. Guzeva, I. V. Fedorova. CHEMICAL FRACTIONS OF HEAVY METALS IN SEDIMENTS OF LAKES ON SAMOYLOV ISLAND, THE LENA DELTA**

The article focuses on studying the total content and chemical fractions of heavy metals (Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) in sediments of two lakes on Samoylov Island in the Lena delta. The lakes differ in genesis and hydrological conditions. Geochemical

data for the study area were summarized. We used the sequential extraction procedure to research the roles of different sediment components in the accumulation of microelements. ICP AES was the method for all the chemical analyses. The results reveal a quite homogeneous vertical distribution of heavy metals in cores from the two lakes over the entire period of their existence (ca. 3 Ka according to radiocarbon dating). The average concentrations of the heavy metals were comparable to their content in sediments from other lakes, as well in the island soils. Analysis of the chemical fractions of the heavy metals showed that the elements were mainly stored in stable forms (bound to the crystal lattice of minerals). However, humic matter plays a significant role in binding the cations of all the metals to stable complex compounds. Cu, Pb and Zn had the most organophilic properties in the two lakes. It was noted that a significant proportion of Ni, Cr, Zn and Cu was bonded with Fe and Mn oxides. Cr, Cu, Zn and Mn were found in potentially bioavailable forms. The most mobile elements were Mn and Zn. There is a high risk of secondary water pollution with these metals.

**Keywords:** lake sediments; heavy metals; chemical fractions of heavy metals; Samoylov Island; the Lena delta.

## Введение

Дельта р. Лены расположена в Арктической зоне РФ в области многолетнемерзлых пород. Данная территория является потенциально чистой, так как находится на значительном расстоянии от промышленных объектов. Однако в период активного хозяйственного освоения северных областей антропогенное влияние на природные экосистемы становится все более ощутимым. Стоит отметить, что арктические экосистемы характеризуются низкой восстановительной способностью вследствие климатических особенностей высокоширотных областей. Тяжелые металлы (ТМ), являющиеся широко распространенными токсичными загрязнителями, могут переноситься воздушными массами на значительные расстояния, воздействуя даже на самые отдаленные территории [Виноградова, 2011]. В связи с уязвимостью экосистем Арктики, потенциальным увеличением уровня антропогенного воздействия на них, а также климатическими изменениями в зоне вечной мерзлоты [Fedorova et al., 2019] одной из важнейших научных задач становится комплексная эколого-геохимическая оценка водных объектов региона для оптимизации методов их дальнейшего геоэкологического мониторинга.

Донные отложения (ДО) озер являются депонирующей природной средой. Их химический состав дает представление о региональном геохимическом фоне, служит интегральным показателем состояния водных экосистем и позволяет строить прогнозы об их устойчивости к потенциальному антропогенному воздействию. При изменении физико-химических характеристик среды, в частности, в результате хозяйственной деятельности человека донные

осадки могут становиться источником вторичного загрязнения водоема.

Цель работы – исследование содержания ТМ и форм их нахождения в донных отложениях озер о. Самойловский (дельта р. Лены), имеющих различное происхождение и гидрологический режим. В задачи работы включены следующие аспекты:

- 1) Выполнить анализ валового содержания ряда ТМ (Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) в колонках донных отложений двух озер о. Самойловский. Обобщить и сравнить полученные данные с результатами по другим ранее исследованным озерам [Четверова и др., 2013] и почвам острова [Antcibor et al., 2014], а также с кларковыми значениями для анализируемых элементов. Эта информация важна для дальнейшего установления регионального геохимического фона территории, необходимого для мониторинговых исследований.
- 2) Проанализировать формы нахождения ТМ, их соотношение и вертикальное распределение в ДО озер о. Самойловский. Это исследование позволит выявить наиболее подвижные (потенциально биодоступные) химические элементы в водной экосистеме, а также оценить роль различных фаз-накопителей (гумусовые вещества, глинистые минералы, оксиды железа и марганца) в связывании ТМ в устойчивые соединения.
- 3) Исследовать вертикальное распределение ТМ в колонках ДО в сочетании с гранулометрическим составом, содержанием органического вещества, а также радиоуглеродным датированием возраста осадков. Эта работа позволит оценить скорость осадко-накопления, временную динамику поступления ТМ в изученные озера острова, опреде-

лить взаимосвязь гранулометрических характеристик ДО с уровнем накопления ТМ, а также выявить различия и сходство геохимических параметров озер, в разной степени испытывающих влияние термокарстовых процессов и речных вод.

### Объект исследования

Территория дельты р. Лены расположена в зоне вечной мерзлоты. Мощность многолетнемерзлых пород составляет 500–600 м [Romanovskii, Hubberten, 2001]. Здесь широко развиты термокарстовые процессы. В геоморфологическом строении дельты выделяют три речные террасы [Григорьев, 1993], на первой из которых находится о. Самойловский. Эта терраса сложена голоценовыми аллювиальными отложениями. Формация островов Оленекской и Арынской проток дельты р. Лены образовалась около семи тысяч лет назад [Are, Reimnitz, 2000]. Сам же о. Самойловский – сравнительно молодой, он сформировался около 4 тысяч лет назад [Schwamborn et al., 2002]. К настоящему моменту в дельте р. Лены насчитывается около полутора тысяч островов и около 60 тысяч озер, большинство из которых имеет термокарстовое и полигональное происхождение. Практически все типы озер [Chetverova et al., 2017], встречающиеся в пределах дельты, представлены на о. Самойловский, где расположена научно-исследовательская станция.

Остров Самойловский (72°22' с. ш. 126°28' в. д.) находится недалеко от о. Столб – места разветвления основных проток р. Лены (рис. 1). Высота о. Самойловский составляет 8–12 м. Его территория четко разделяется на две части границей, простирающейся в северо-восточном направлении [Большаинов и др., 2008]. Северо-западная пойменная часть острова сложена песчаными и алевритовыми отложениями и ежегодно затопляется во время половодья. К востоку от границы территория острова состоит из слоистых органоминеральных отложений и представляет собой полигональную тундру со старичными озерами, которые в южной части острова затопляются речными водами в периоды половодий. Согласно [Четверова и др., 2013], основными факторами, определяющими формирование всех озер острова, являются термокарст и влияние речных вод, поэтому на острове выделено три основных типа озер: термокарстовые, полигональные и старичные, а также нескольких промежуточных подтипов, формирующихся под влиянием нескольких факторов.

В данной работе исследовались колонки ДО из двух озер (рис. 1): Моло – термокарстовое, Баня – старично-термокарстовое. Озеро Моло изолировалось от речного влияния достаточно давно, поэтому на его морфометрические и гидрологические характеристики влияют преимущественно термокарстовые процессы. Наибольшая глубина зафиксирована в центральной части

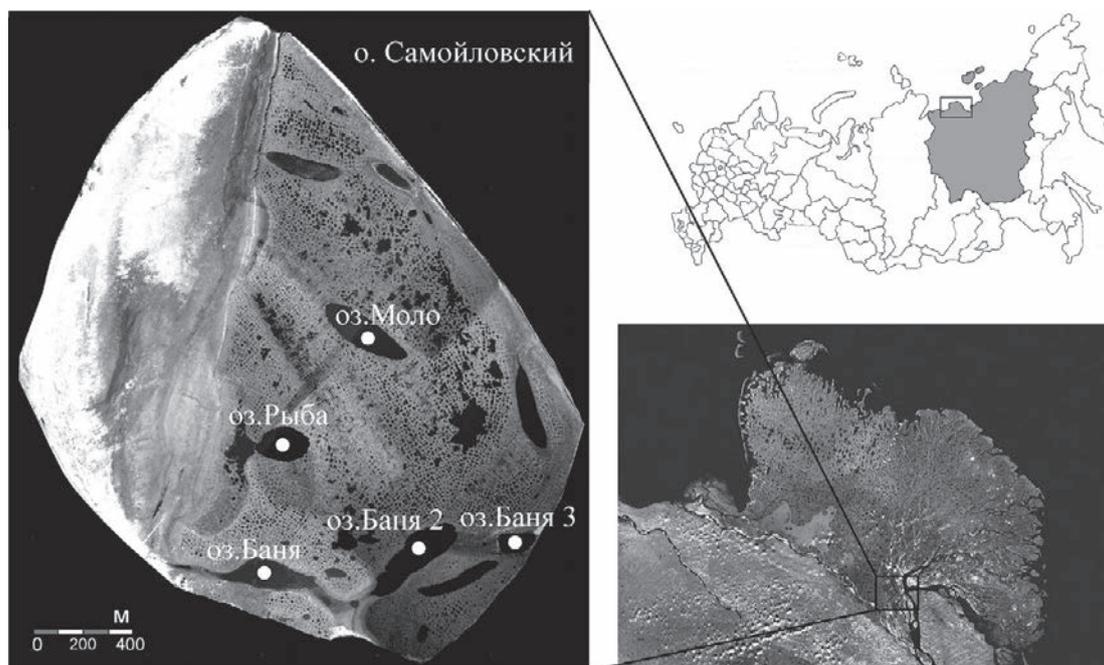


Рис. 1. Карта-схема озер о. Самойловский

Fig. 1. Schematic map of lakes on Samoylov Island

озера – около 6 м. Озеро Баня большую часть года, а иногда и в течение нескольких лет, оказывается в изоляции от речных вод, вследствие чего подвергается в основном влиянию термокарстовых процессов – его глубина увеличивается и в период отбора проб составляла 4,5–5 м.

Однако во время высокого уровня половодий оз. Баня может затапливаться речными водами, что отражается в сезонных изменениях его гидрохимических показателей: концентрации растворенного кремния, содержании некоторых биогенных элементов [Четверова и др., 2013; Chetverova et al., 2017]. Важно также отметить, что озеро в настоящий момент активно используется в хозяйственных целях для обеспечения функционирования научной станции, находящейся в южной части о. Самойловский.

### **Методика отбора проб и исследования донных отложений озер о. Самойловский**

Колонки ДО отбирались в наиболее глубоководных частях озер с помощью пробоотборника UWITEC. Из каждого озера взято по две колонки: оз. Моло – 33 и 35 см, оз. Баня – 19 и 18 см. Колонки подготавливались следующим образом:

1. Первая колонка была разделена на слои по 1 см для анализа валового содержания ТМ, определения общего количества органического вещества (ГОСТ 23740–2016), а также определения возраста ДО с помощью радиоуглеродного метода с использованием калибровочной программы OxCal 4.3 на базе лаборатории им. В. П. Кёппена Ресурсного центра СПбГУ.

2. Вторая колонка разделялась на слои в соответствии с их литологическими характеристиками для определения гранулометрического состава с помощью ситового и ареометрического методов (ГОСТ 12536–79), а также для исследования химических форм ТМ. В зависимости от размера преобладающей фракции осадки классифицировались [Кленова, 1948] на песок (содержание частиц < 0,01 мм (пелитовой фракции, ПФ) – от 0 до 5 %), илистый песок (содержание ПФ от 5 до 10 %), песчаный ил (доля ПФ от 10 до 30 %), ил (доля ПФ от 30 до 50 %), глинистый ил (с содержанием ПФ свыше 50 %).

Далее проводился анализ валового содержания и форм нахождения элементов Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn в пробах ДО как наиболее распространенных ТМ, ассоциированных с хозяйственной деятельностью человека. Для характеристики подвижности элементов используются понятия «легкодоступные», «умеренно доступные» и «труднодоступные формы» [Курилов

и др., 2007]. Чем легче с помощью химических реагентов извлекается форма, тем подвижнее и потенциально опаснее она в системе. В настоящее время существует ряд методик с использованием различных реактивов для извлечения форм тяжелых металлов из почв и донных осадков [Tessier, 1979; Davidson et al., 1994; Yuan et al., 2004]. Нами была выбрана наиболее оптимальная схема последовательной экстракции, позволяющая добиться максимальной селективности фракционирования, снизив при этом риск вторичного поглощения ионов металлов компонентами ДО. Используемые экстрагирующие реагенты оказывают влияние либо на отдельную группу компонентов осадка (например, на оксидные соединения железа), либо на определенный тип связи ионов металлов с твердыми фазами-носителями (например, вытеснение обменных катионов из поглощающего комплекса ДО). В результате последовательной обработки навески из пробы ДО реагентами в раствор переходят ионы и соединения, которые можно объединить в одну фракцию (фазу) ТМ.

В работе использованы следующие реагенты:

1. 1М раствор  $MgCl_2$ , для извлечения обменных (адсорбированных) катионов металлов, которые могут высвободиться в процессе десорбции при изменениях ионного состава вод озера. Является самой подвижной и потенциально доступной для живых организмов формой.
2. 1М раствор  $CH_3COONa + CH_3COOH$ , pH 5, для экстракции специфически сорбированных металлов, связанных с карбонатными минералами и легко разлагаемым органическим веществом. Высвобождение может происходить при изменениях pH среды.
3. Раствор  $K_4P_2O_7$ , pH 11, для извлечения металлов, связанных с гумусовым веществом ДО. Тяжелые металлы довольно прочно связаны в устойчивые комплексы, однако могут высвободиться в процессе полной деструкции органического вещества.
4. 0,04М  $NH_2OH-HCl$  в 25%  $CH_3COOH$ , pH 2, для экстракции ТМ, связанных с аморфными гидратированными оксидами Fe и Mn, которые являются существенными поглотителями микроэлементов. Металлы относительно прочно связаны с фазой-накопителем, однако при сильном воздействии – существенном понижении Eh-потенциала в область восстановительной обстановки – высвобождаются.
5. Остаточная (устойчивая) фракция, вычисляемая при помощи вычитания суммы результатов предыдущих четырех фаз из валового содержания химического элемента. Она связана с кристаллической решеткой

первичных и вторичных минералов озерных отложений. Наиболее прочно связанные катионы, недоступные для вовлечения в биогеохимические циклы (только в случае механического перемещения в составе частиц).

После получения фракционных вытяжек растворы анализировались с помощью атомно-эмиссионного метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES) на анализаторе Shimadzu 9000 на базе Ресурсного центра СПбГУ по направлению «Химия».

При анализе валового, то есть суммарного, содержания ТМ в ДО озер аналитические навески из проб обрабатывались сильными кислотами (HCl, HF, HNO<sub>3</sub>) и подвергались полному разложению в микроволновой печи при поддержании температуры 210 °С и давлении 17500 кПа по методике М-МВИ-80–2008. Далее растворы также анализировались методом ICP AES. При выполнении всех геохимических анализов готовилось по два образца каждой пробы для параллельного измерения. За приемлемый результат принималось среднее значение двух измерений, если разница между ними не превышала 30 %.

Оценку степени риска для водной экосистемы с точки зрения подвижности (легкодоступности) металлов проводили с применением показателя вероятности вторичного загрязнения воды (RAC) [Perin et al., 1985; Passos et al., 2010]. Он учитывает силу связи металлов с ДО (в зависимости от процентного содержания обменной и карбонатной фракции металла). Согласно данному показателю выделяют 5 степеней риска: < 1 % – отсутствие риска, 1–10 % – низкая степень, 10–30 % – средняя, 30–50 % – высокая, > 50 % – очень высокая.

## Результаты и обсуждение

**Абсолютный возраст донных отложений.** Результаты радиоуглеродного анализа показали, что исследованные озера образовались в голоцене около 3 тыс. лет назад,

причем оз. Моло сформировано раньше, чем оз. Баня. Осадки колонки на глубине 10–13 см из оз. Баня имеют возраст  $2640 \pm 320$  лет; в оз. Моло возраст осадков на глубине 11–14 см –  $2570 \pm 190$  лет, а слоя 24–26 см –  $2810 \pm 240$  лет.

**Гранулометрический состав донных отложений.** Гранулометрический анализ отложений проведен в трех выделенных литологических слоях. Верхний слой (0–4 см для оз. Баня и 0–5 см для оз. Моло) являлся серым мягким илом с коричневыми пятнами, вероятно свидетельствующими о наличии оксидов трехвалентного Fe. В средней части колонки (до 10–15 см) осадки характеризовались присутствием большого количества слаборастворившихся растительных остатков, в нижних частях колонок количество органических остатков оказалось ниже. По данным гранулометрического анализа, во всех слоях колонок преобладают фракции 0,01–0,001 и 0,1–0,01 мм. Процентное соотношение частиц разных размеров представлено в табл. 1. Результаты позволяют отнести осадки оз. Моло к илам, а оз. Баня – к глинистым илам [Кленова, 1948].

**Валовое содержание ТМ.** Анализ валовых концентраций Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn выявил достаточно однородный характер вертикального распределения элементов в колонках (рис. 2) (распределения подчиняются нормальному закону, коэффициент вариации для выборок большинства элементов в двух озерах не превышает 33 %), а также сходное среднее содержание металлов в двух озерах различного происхождения (оз. Баня и оз. Моло). Сравнение средних значений двух выборок (для оз. Моло n=35, для оз. Баня n=18) с помощью критерия Стьюдента не выявило статистически значимого различия между ними. Полученные данные говорят о сравнительно равномерном поступлении ТМ в экосистемы изученных озер на протяжении всего периода их существования (около 3 тыс. лет).

Таблица 1. Гранулометрические характеристики (%) донных отложений озер Баня и Моло

Table 1. Particle size distribution (%) in the layers of sediment cores from Lake Banyu and Lake Molo

Название озера Name of lake	Горизонт колонки, см Layer of core, cm	Размер частиц, мм (%) Particle size, mm (%)			
		1–0,1	0,1–0,01	0,01–0,001	< 0,001
оз. Баня Lake Banyu	0–4	4	33	60	3
	4–15	4	29	58	9
	15–18	3	30	62	5
оз. Моло Lake Molo	0–5	5	45	47	3
	5–15	2	52	41	5
	15–25	3	48	42	7
	25–35	4	41	50	5

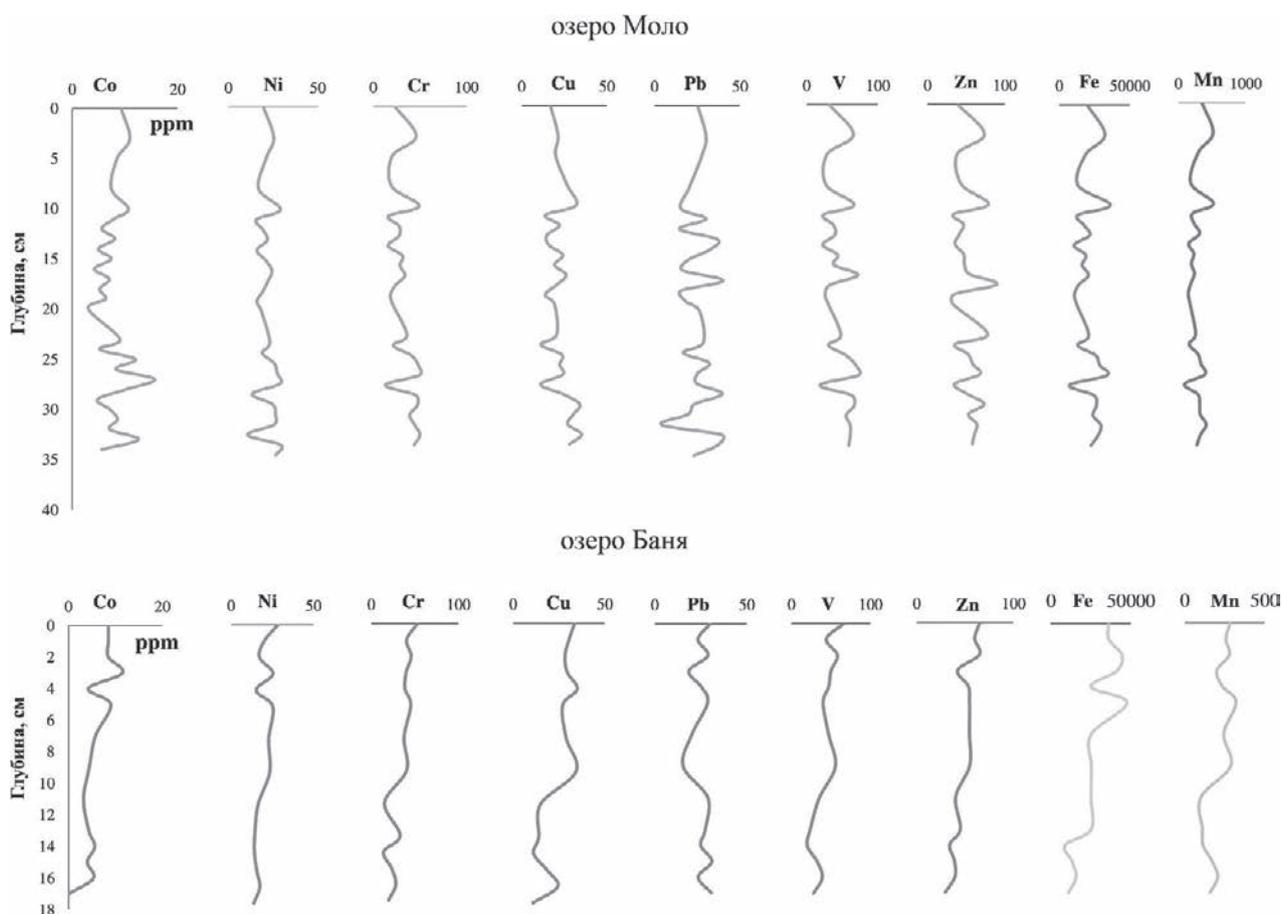


Рис. 2. Вертикальное распределение содержания химических элементов (мг/кг) в колонках донных отложений озер Моло и Баня

Fig. 2. Vertical distribution of the trace metals content (mg/kg) in sediment cores from Lake Molo and Lake Banya

ДО двух озер также имеют достаточно схожие гранулометрические характеристики по всей глубине колонок – илы и глинистые илы. Каких-либо значимых различий в накоплении ТМ между слоями ДО выявлено не было. В предыдущих работах [Четверова и др., 2013] уже анализировались концентрации некоторых ТМ (Cu, Ni, Pb, V, Zn) в солянокислых вытяжках из ДО других озер о. Самойловский (рис. 1): термокарстового оз. Рыба, старично-термокарстового оз. Баня 2, а также старично-пойменного оз. Баня 3, которое имеет постоянную связь с водами Оленекской протоки р. Лены. Нами также проанализированы концентрации и других, ранее не исследованных в ДО элементов – Cr, Co, Fe, Mn. Содержание ряда металлов изучено и в почвах о. Самойловский на участках, имеющих разный режим затопления речными водами [Antcibor et al., 2014]. Сравнение результатов различных исследований представлено в табл. 2. Полученные авторами в ходе данной работы валовые содержания ТМ (Cu, Ni, Pb, V, Zn) в колонках озер Баня и Моло соотносятся с полученными для других

озер острова, – как среднее содержание элементов всей колонки, так и характер вертикального распределения.

При анализе и сравнении накопленных к настоящему моменту геохимических данных о среднем валовом содержании элементов в почвах и ДО всех исследованных озер о. Самойловский обнаружены более высокие концентрации Pb и Cu в ДО, а для Co наблюдается обратное соотношение. Среднее валовое содержание большинства проанализированных элементов (Fe, Mn, V, Zn, Cu, Ni, Cr) в ДО всех исследованных озер о. Самойловский находится ниже значения кларка элемента в верхней части земной коры (табл. 2). Однако для Pb в озерных осадках показано двукратное превышение кларка, а для Co значение кларка в 2,5 раза превышено в почвах. Данную информацию следует иметь в виду при дальнейших эколого-геохимических исследованиях территории. Однако для определения регионального геохимического фона (в том числе превышающего кларковые содержания по некоторым элементам) необходимо продолжить накопле-

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях озер и почвах о. Самойловский

Table 2. Total content of trace metals in lake sediments and soils of Samoylovsky Island

Название озера Name of lake	Слой колонки, см Layer of core, cm	Содержание химических элементов (мг/кг) Total content of trace metals (mg/kg)								
		Cu	Ni	Pb	V	Zn	Cr	Co	Fe	Mn
оз. Баня 3* Lake Banyu 3	0–5	14,3	26,4	28,1	74,9	67,9				
	5–10	14,3	27,7	28,2	79,3	71,3	–	–	–	–
	10–17	17,9	29,9	28,8	82,9	76,8				
оз. Баня 2* Lake Banyu 2	3–7	11,1	23,0	25,5	66,7	61,1				
	13–17	15,2	25,8	26,4	74,2	67,3	–	–	–	–
	17–21	19,5	32,1	29,8	90,1	83,2				
оз. Баня Lake Banyu	0–4	33,0	28,6	30,1	66,8	65,2	53,2	10,5	36200	284
	4–10	29,2	22,8	28,1	47,0	54,6	37,6	6,5	25200	263
	10–16	18,0	15,5	32,3	32,0	50,0	23,5	5,7	11120	160
	16–19	10,0	13,7	30,6	28,1	39,2	21,6	4,0	13460	200
оз. Рыба* Lake Ryba	0–5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5–15	19,3	32,8	29,1	82,9					
	15–25	18,8	31,1	28,5	87,5					
оз. Моло Lake Molo	0–5	18,4	22,1	33,2	43,2	56,3	40,0	11,1	25530	406
	5–15	20,0	20,5	35,0	35,1	48,2	30,1	11,7	18825	237
	15–20	20,6	20,6	42,1	42,0	74,3	27,5	12,4	16644	200
	20–25	21,0	20,0	36,2	36,4	50,2	26,0	10,3	18185	199
	25–30	21,8	23,1	25,0	55,1	53,6	39,6	10,0	24096	283
	30–33	31,0	43,0	40,2	60,0	70,5	15,0	11,4	25800	334
Почвы, затопляемые паводком** Soils of the flooded area	Окаймление полигона Polygon rim	4,5	17,2	4,7	–	39,1	–	48,8	15500	271
	Центр полигона Polygon center	7,8	18,2	5,3	–	75,1	–	43,5	15650	260
Почвы высокой, незатопляемой части** Soils of the flood-free area of the first terrace	Окаймление полигона Polygon rim	4,5	21,7	6,9	–	59,3	–	40,9	18900	334
	Центр полигона Polygon center	11,0	18,5	7,6	–	49,0	–	40,2	18800	187
Кларк элемента в верхней части континентальной земной коры*** Clarke of the upper Earth crust		27,0	50,0	16,0	97,0	67,0	92,0	17,3	39180	774

Примечание. \*По: Четверова и др., 2013 (ICP AES, растворение HCl<sub>конц.</sub>); \*\*по: Antcibor et al., 2014 (ICP AES, растворение HCl 30% + HNO<sub>3</sub> 60%); \*\*\* для Pb по: Виноградов, 1962; для Zn, Co, V, Mn, Fe по: Rudnick, Gao, 2003; для Cr, Ni по: Григорьев, 2009; для Cu по: Hu, Gao, 2008.

Note. \*Results after: Chetverova et al., 2013 (ICP AES, Solution by HCl); \*\*results after: Antcibor et al., 2014 (ICP AES, solution by HCl 30% + HNO<sub>3</sub> 60%); \*\*\*clarke concentration for Pb after: Vinogradov, 1962; for Zn, Co, V, Mn, Fe after: Rudnick, Gao, 2003; for Cr, Ni after: Grigor'ev, 2009; for Cu after: Hu, Gao, 2008.

ние данных. В экологической геохимии кларки химических элементов, наряду с гигиеническими нормативами и региональным геохимическим фоном, служат некоторыми эталонами для сравнения полученных в ходе исследований результатов. В условиях потенциально чистой территории дельты р. Лены использование значений кларков в качестве условных опорных содержаний представляется приемлемым. Важно, однако, учитывать, что к настоящему времени существует большое количество работ, посвященных исследованию среднего содержания химических элементов

в верхнем слое континентальной земной коры [Виноградов, 1962; Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008; Григорьев, 2009]. Данные разных авторов для ряда элементов могут значительно отличаться друг от друга. В статье [Касимов, Власов, 2015] проанализированы важнейшие работы в этой области и даны рекомендации по использованию значений кларков, приводимых разными авторами, для каждого из наиболее часто анализируемых в экологических исследованиях химических элементов. Эти замечания были учтены при составлении табл. 2.

**Фазовый анализ форм тяжелых металлов.** По результатам анализа всего спектра форм исследованных ТМ оценена роль их основных фаз-носителей в ДО озер о. Самойловский. Практически для всех элементов преобладает (более 50–80 % от валового содержания) устойчивая фаза (фракция 5), связанная с кристаллической решеткой первичных и вторичных минералов. Она является труднодоступной и потенциально не может участвовать в биогеохимических циклах озерных экосистем. Данный факт подтверждает предположение о ведущей роли горных пород, слагающих водосборную площадь озер, а также подстилающих их котловины, в формировании отложений. Однако для Mn и Zn минеральная фракция не является доминирующей в двух изученных озерах. Значительная доля от валового содержания этих металлов связана и с другими фракциями, в том числе подвижными.

Для большинства проанализированных элементов следующей существенной фазой-накопителем является гумусовое вещество озерных отложений. Анализ общего содержания органических веществ (потери при прокаливании, 550 °С) во всех слоях колонок показал, что в осадках оз. Моло содержится больше органики (10–16 %), чем в отложениях оз. Баня (3–6 %). При этом роль органического вещества в связывании всех тяжелых металлов несколько сильнее выражена в осадках оз. Моло. В наибольшей степени органомфильные свойства в двух озерах проявляют Cu, Fe, Pb и Zn. Доля (% от валового содержания) ТМ, ассоци-

ированных с данной фракцией, представлена на рис. 3.

Гумусовые кислоты (гуминовые и фульвокислоты) образуют с ТМ устойчивые металлорганические комплексы (хелатные соединения), снижая их токсичность [Попов, 2004]. Данная фаза может стать основным аккумулятором поллютантов при повышении уровня их поступления в условиях потенциального возрастания антропогенного воздействия на арктические экосистемы. Значимое влияние гумуса на геохимическое поведение ТМ в пресноводных объектах в различных климатических условиях было отмечено и в работах других исследователей [López et al., 2010]

Большинство элементов также обнаружено в фазе, связанной с гидратированными оксидами Fe и Mn (аморфные), которые являются превосходными накопителями ТМ [Turner, 2000]. Такие соединения Fe и Mn могут быть представлены в осадках в качестве конкреций, цемента или же пленки на твердых частицах. Наиболее значимой данная фракция является для Zn, Ni, Cu, Cr, Mn, Fe (рис. 4). В то же время стоит заметить, что в осадках оз. Моло с данной фазой-носителем ассоциировано 3–6 % валового количества V, а в отложениях оз. Баня – менее 1 % по всей глубине колонки.

ТМ, связанные с гумусовым веществом и гидратированными оксидами Fe и Mn, находятся в умеренно доступных формах. Они могут высвобождаться лишь при значительном воздействии на фазу-накопитель: деструкция,

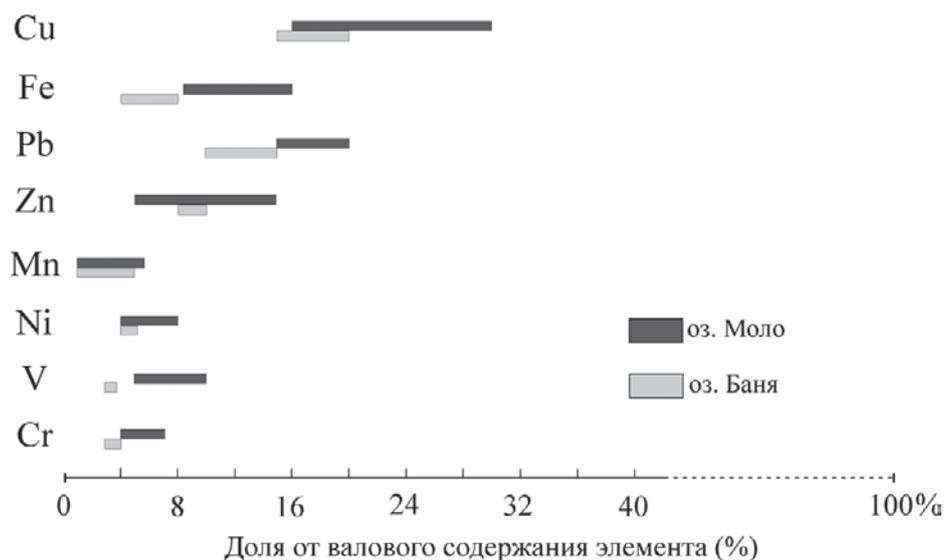


Рис. 3. Доля (%) тяжелых металлов, связанных с органическим веществом донных отложений (диапазон на всей глубине колонок из озера Моло и озера Баня)

Fig. 3. Proportion (%) of trace metals associated with the organic matter of lake sediments (range over the entire depth of the cores from Lake Molo and Lake Banyá)

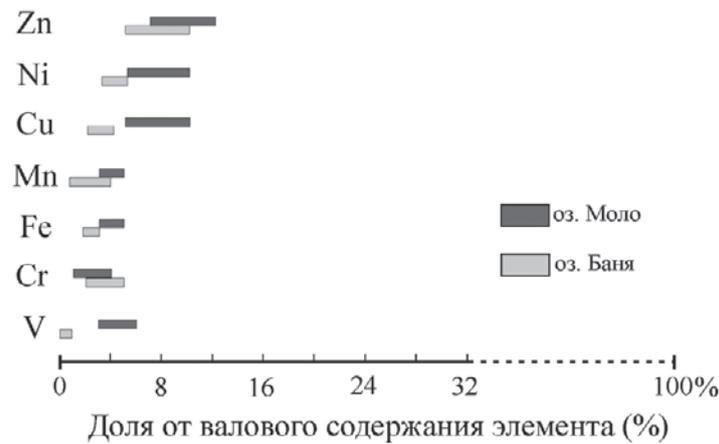


Рис. 4. Доля (%) тяжелых металлов, связанных с оксидами Fe и Mn донных отложений (диапазон на всей глубине колонок из озер Моло и Баня)

Fig. 4. Proportion (%) of trace metals associated with Fe and Mn oxides of lake sediments (range over the entire depth of the cores from Lake Molo and Lake Banyá)

существенное изменение физико-химических параметров среды.

С карбонатными минералами и легко разлагаемым органическим веществом ассоциировано 8–20 % Zn, 8–22 % Cu, 2–7 % Mn, 1,5–5 % Cr, для Pb, Ni, V, Fe и Co данная фаза составила < 1 % от валового содержания. Роль фракции 2 в связывании ТМ сопоставима в двух изученных озерах. Значимость данной фракции для ряда элементов, вероятно, объясняется преобладанием карбонатных и терригенно-карбонатных пород палеозойского-мезозойского возраста среди дочетвертичных образований, слагающих территорию дельты р. Лены [Большаянов и др., 2013]. Стоит заметить, что токсичные элементы в данной фазе находятся в относительно неустойчивых соединениях и при колебаниях значений физико-химических параметров среды могут становиться легкодоступными для живых организмов.

В наиболее подвижной форме (обменные катионы) по всей глубине колонок осадков двух озер был идентифицирован Mn (30–50 % в оз. Моло и 8–12 % в оз. Баня). В ДО оз. Моло по всей глубине колонки в обменной форме также обнаружен Zn (10–15 % от валового содержания). Для остальных элементов данная фракция составляет менее 1 % от валового содержания. Таким образом, осадки оз. Моло характеризуются большей подвижностью некоторых исследованных металлов.

Согласно оценке степени риска по показателю вероятности вторичного загрязнения воды элементы разделены на следующие категории: Mn и Zn – высокая степень; Cu – средняя

степень; Cr – низкая степень; Co, Fe, Pb, V, Ni – отсутствие риска.

#### Выводы

В работе выполнен анализ вертикального распределения валовых концентраций ТМ (Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) в колонках ДО двух озер о. Самойловский, имеющих разное происхождение и гидрологический режим. Результаты выявили относительно равномерную динамику поступления исследованных элементов в экосистемы водных объектов на протяжении всего периода их существования (около 3 тыс. лет). Средние концентрации большинства ТМ соотносимы в осадках озер различных типов, а также почвах острова.

Кроме того, авторами сделана попытка предварительно оценить вклад основных компонентов озерных осадков в накопление ТМ. Результаты показали, что проанализированные элементы накапливаются в ДО преимущественно в устойчивой форме, связанной с кристаллической решеткой минералов. Однако гумусовое вещество играет существенную роль в связывании ионов всех ТМ в устойчивые комплексные соединения. Оно может служить одним из основных твердофазных накопителей микроэлементов в ДО водоемов при дальнейшем возрастании уровня их поступления в экосистемы. Отмечено также, что значимая доля Ni, Cr, Zn, Cu, Mn и Fe ассоциирована с гидратированными оксидами Fe и Mn. В легкодоступных формах обнаружены Mn, Zn, Cr, Cu. Самыми мобильными среди них оказа-

лись Mn и Zn (наличие в обменных формах), для этих металлов показана высокая вероятность вторичного загрязнения вод. Стоит также отметить, что осадки термокарстового оз. Моло характеризуются большей подвижностью элементов, нежели ДО оз. Баня. Эту информацию необходимо учитывать при дальнейших геохимических исследованиях озер дельты р. Лены.

Полученные в работе данные важны для установления регионального геохимического фона изученной территории. Они также будут полезны для мониторинговых исследований лимносистем, расположенных не только в пределах дельты Лены, но и в других областях Арктики.

*Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата». Полевые материалы получены в рамках российско-германской экспедиции «Лена 2016, 2019». Анализы выполнены на базе ресурсного центра СПбГУ: РОЦ по направлению «Химия», лаборатория им. В. П. Кёппена.*

## Литература

Большаянов Д. Ю., Макаров А. С., Шнайдер В., Штоф Ф. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.

Большаянов Д. Ю., Макаров А. С., Федорова И. В., Жиров А. И. Гидроморфогенез дельты р. Лены // Доклады и сообщения 23-го пленарного межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Калуга, 2008. С. 56–68.

Виноградова А. А. Тенденции изменения источников и стоков антропогенных тяжелых металлов в атмосфере Арктики на рубеже XX и XXI веков // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen, 2011. С. 215–234.

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

Григорьев М. Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1993. 175 с.

Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.

Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.

Кленова М. В. Геология морей. М.: Учпедгиз, 1948. 182 с.

Курилов П. И., Федотов П. С., Круглякова Р. П., Шевцова Н. Т. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2007. № 9. С. 58–62.

Попов А. И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 248 с.

Четверова А. А., Федорова И. В., Потапова Т. М., Бойке Ю. Гидрологические и геохимические особенности современного состояния озер о. Самойловский в дельте р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. Т. 1, № 95. С. 97–110.

Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbach L. Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of the Lena River delta and its hinterland, Northern Siberia, Russia // Biogeosciences. 2014. Vol. 11. P. 1–15. doi: 10.5194/bg-11-1-2014

Are F., Reimnitz E. An overview of the Lena River Delta settings: geology, tectonics, geomorphology, and hydrology // J. Coast. Res. 2000. Vol. 16, no. 4. P. 1083–1093.

Chetverova A., Skorospekhova T., Morgenstern A., Alekseeva N., Spiridonov I., Fedorova I. Hydrological and hydrochemical characteristics of lakes in the Lena River delta (Northeast-Siberia, Russia) // Polarforschung. 2017. Vol. 87, no. 2. P. 111–123. doi: 10.2312/polarforschung.87.2.111

Davidson C. M., Thomas R. P., McVey S. E., Peralta R., Littlejohn D., Ure A. M. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments // Anal. Chim. Acta. 1994. Vol. 291, no. 3. P. 277–286. doi: 10.1016/0003-2670(94)80023-5

Fedorova I., Dmitriev V., Shestakova E., Guzeva A., Alekseeva N. Nonadditive parameters of arctic aquatic ecosystems // 19<sup>th</sup> Int. Sci. GeoConference SGEM 2019. Albena, Bulgaria, 2019. P. 269–276.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010

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 Pollution. 2010. Vol. 213. P. 27–45. doi: 10.1007/s11270-010-0364-6

Perin G., Craboledda L., Lucchese M., Cirillo R., Dotta L., Zanette M. L., Orio A. A. Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea- a new approach for environmental toxicity determination // Heavy Metal in the Environ. / Ed. T. D. Lekkas. Edinburg: CEP Consultants, 1985. Vol. 2. P. 454–456.

Passos E. A., Alves J. P., Garcia C. A., Costa A. S. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil // J. Brazil. Chem. Soc. 2011. Vol. 22, no. 5. P. 811–1004. doi: 10.1590/S0103-50532011000500004

Romanovskii N. N., Hubberten H. W. Results of permafrost modeling of the lowlands and self of the Laptev Sea region // Russia-Permafrost Periglacial Processes. 2001. Vol. 12. P. 191–202.

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry. Vol. 3. The Crust. Elsevier Sci., 2003. P. 1–64.

Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M. N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta

// INQUA, Quaternary Int. 2002. Vol. 89. P. 119–134. doi: 10.1016/S1040-6182(01)00084-2

Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. Vol. 51, no. 7. P. 844–851. doi: 10.1021/ac50043a017

Turner A. Trace metal contamination in sediments from UK estuaries: an empirical evaluation of the role of hydrous iron and manganese oxides // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2000. Vol. 50, no. 3. P. 355–371. doi: 10.1006/ecss.1999.0573

Yuan C. G., Shi J. B., He B., Liu J. F., Liang L. N., Jiang G. B. Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction // *Environ. Int.* 2004. Vol. 30, no. 6. P. 769–783. doi: 10.1016/j.envint.2004.01.001

Postupila v redakciju 23.04.2020

## References

Bol'shiyanov D. Yu., Makarov A. S., Shnaider V., Shtof G. Proiskhozhdenie i razvitie del'ty reki Leny [Origin and development of the delta of the Lena River]. St. Petersburg: AANII, 2013. 268 p.

Bol'shiyanov D. Yu., Makarov A. S., Fedorova I. V., Zhirov A. I. Gidromorfogenez del'ty r. Leny [Hydromorphogenesis of the delta of the Lena River]. *Dokl. i sobshch. 23-go plenarnogo mezhvuz. koordinatsionnogo soveshch. po probl. erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov* [Proceed. 23<sup>rd</sup> plenary inter-univ. coordination meeting on the probl. of erosion, channel, and well-head processes]. Kaluga, 2008. P. 56–68.

Chetverova A. A., Fedorova I. V., Potapova T. M., Boike J. Hidrologicheskie i geokhimicheskie osobennosti sovremennogo sostoyaniya ozer o. Samoilovskii v del'te r. Leny [Hydrological and geochemical features of the current state of the lakes on Samoylov Island in the Lena River Delta]. *Probl. Arktiki i Antarktiki* [Probl. Arctic and Antarctic]. 2013. Vol. 1, no. 95. P. 97–110.

Grigor'ev M. N. Kriomorfogenez ust'evoi oblasti r. Leny [Cryomorphogenesis of the estuarine region of the Lena River]. Yakutsk: IMZ SO RAN, 1993. 175 p.

Grigor'ev N. A. Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory [Distribution of chemical elements in the surface layer of continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 382 p.

Kasimov N. S., Vlasov D. V. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimi [Clarks of chemical elements as reference standards in environmental geochemistry]. *Vestnik Moskovskogo univ. Ser. 5. Geografiya* [MSU Bull. Ser. 5. Geography]. 2015. No. 2. P. 7–17.

Klenova M. V. Geologiya morei [Marine geology]. Moscow: Uchpedgiz, 1948. 182 p.

Kurilov P. I., Fedotov P. S., Krugliakova R. P., Shevtsova N. T. Formy nakhozhdeniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh Azovskogo morya [Chemical forms of the heavy metals in the bottom sediments of the Sea of Azov]. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse* [Environ. Protection in Oil-Gas Industry]. 2007. No. 9. P. 58–62.

Popov A. I. Guminovye veshchestva: svoistva, stroenie, obrazovanie [Humic substances: properties, composition and formation]. St. Petersburg: St. Petersburg State Un-ty, 2004. 248 p.

Vinogradova A. A. Tendentsii izmeneniya istochnikov i stokov antropogennykh tyazhelykh metallov v atmosfere Arktiki na rubezhe XX i XXI vekov [Trends in the sources and drainage of anthropogenic heavy metals in the atmosphere of the Arctic on the cusp of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries]. *Meteorol. i geofizicheskie*

*issled.* [Meteorol. and geophysical studies]. Moscow: Paulsen, 2011. P. 215–234.

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

Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbach L. Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of the Lena River delta and its hinterland, Northern Siberia, Russia. *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. P. 1–15. doi: 10.5194/bg-11-1-2014

Are F., Reimnitz E. An overview of the Lena River Delta settings: geology, tectonics, geomorphology, and hydrology. *J. Coast. Res.* 2000. Vol. 16, no. 4. P. 1083–1093.

Chetverova A., Skorospekhova T., Morgenstern A., Alekseeva N., Spiridonov I., Fedorova I. Hydrological and hydrochemical characteristics of lakes in the Lena River delta (Northeast-Siberia, Russia). *Polarforschung*. 2017. Vol. 87, no. 2. P. 111–123. doi: 10.2312/polarforschung.87.2.111

Davidson C. M., Thomas R. P., McVey S. E., Perala R., Littlejohn D., Ure A. M. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments. *Anal. Chim. Acta*. 1994. Vol. 291, no. 3. P. 277–286. doi: 10.1016/0003-2670(94)80023-5

Fedorova I., Dmitriev V., Shestakova E., Guzeva A., Alekseeva N. Nonadditive parameters of arctic aquatic ecosystems. *19<sup>th</sup> Int. Sci. GeoConference SGEM 2019*. Albena, Bulgaria, 2019. P. 269–276.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chem. Geol.* 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010

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 Pollution*. 2010. Vol. 213. P. 27–45. doi: 10.1007/s11270-010-0364-6

Perin G., Craboledda L., Lucchese M., Cirillo R., Dotta L., Zanette M. L., Orio A. A. Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea – a new approach for environmental toxicity determination. *Heavy Metal in the Environ.* Ed. T. D. Lekkas. CEP Consultants: Edinburg. 1985. Vol. 2. P. 454–456.

Passos E. A., Alves J. P., Garcia C. A., Costa A. S. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil. *J. Brazil. Chem. Soc.* 2011.

Vol. 22, no. 5. P. 811–1004. doi: 10.1590/S0103-50532011000500004

*Romanovskii N. N., Hubberten H. W.* Results of permafrost modeling of the lowlands and self of the Laptev Sea region. *Russia-Permafrost Periglacial Processes*. 2001. Vol. 12. P. 191–202.

*Rudnick R. L., Gao S.* Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3. The Crust. Elsevier Sci., 2003. P. 1–64.

*Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M. N.* Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *JIUQR, Quaternary Int.* 2002. Vol. 89. P. 119–134. doi: 10.1016/S1040-6182(01)00084-2

*Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M.* Sequential extraction for the speciation of particulate trace me-

tals. *Anal. Chem.* 1979. Vol. 51, no. 7. P. 844–851. doi: 10.1021/ac50043a017

*Turner A.* Trace metal contamination in sediments from UK estuaries: an empirical evaluation of the role of hydrous iron and manganese oxides. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2000. Vol. 50, no. 3. P. 355–371. doi: 10.1006/ecss.1999.0573

*Yuan C. G., Shi J. B., He B., Liu J. F., Liang L. N., Jiang G. B.* Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction. *Environ. Int.* 2004. Vol. 30, no. 6. P. 769–783. doi: 10.1016/j.envint.2004.01.001

Received April 23, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Гузева Алина Валерьевна

аспирант  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург,  
Россия, 199034

младший научный сотрудник лаб. комплексных проблем  
лимнологии

Институт озераведения РАН, Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский центр Российской  
академии наук (СПб ФИЦ РАН)  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: olina2108@mail.ru

### Федорова Ирина Викторовна

доцент, и. о. заведующей кафедрой геоэкологии  
и природопользования, к. г. н.  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург,  
Россия, 199034  
эл. почта: i.fedorova@spbu.ru

## CONTRIBUTORS:

### Guzeva, Alina

Saint Petersburg State University  
7/9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian  
Academy of Sciences (SPC RAS)  
9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia  
e-mail: olina2108@mail.ru

### Fedorova, Irina

Saint Petersburg State University  
7/9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia  
e-mail: i.fedorova@spbu.ru

УДК 504.45

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕГИОНАЛЬНЫХ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

**Д. В. Иванов, В. С. Валиев, Р. Р. Шагидуллин**

*Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, Казань, Россия*

Современные подходы к экологическому нормированию предполагают установление региональных фоновых концентраций загрязняющих веществ в объектах окружающей среды, на основе которых можно проводить объективную оценку геоэкологической ситуации на определенном пространственном уровне с применением данных мониторинга. Для донных отложений (ДО) водных объектов определение регионального фона загрязняющих веществ, имеющих природные аналоги, приобретает особую актуальность в связи с отсутствием аналогичных санитарно-гигиенических нормативов их пороговых концентраций на федеральном уровне. Углеводороды нефти, определяемые процедурой инструментального анализа как нефтепродукты, являясь структурными компонентами природного органического вещества, поступают в водные объекты и из антропогенных источников, а их накопление в ДО ведет к вторичному загрязнению водных масс и изменению структурно-функциональных характеристик водных экосистем. Установление фоновых уровней нефтяных углеводородов в ДО требует обязательного учета их природной составляющей. На основе репрезентативного материала с применением вариационно-статистического подхода выполнены расчеты фоновых концентраций нефтяных углеводородов в ДО водоемов Республики Татарстан, дифференцирующие природные показатели их накопления в осадках рек, образованных на них водохранилищ и озер региона. Структура изменчивости содержания нефтяных углеводородов в ДО представлена соотношением трех факторов: гидрологическим режимом, содержанием органического вещества и гранулометрическим составом отложений. Фоновые значения и верхние пределы природного содержания нефтепродуктов, превышение которых свидетельствует о наличии загрязнения, установлены с учетом доли биогенной составляющей и пелитовой фракции (< 0,01 мм) в составе отложений. Базовым значением фоновых концентраций нефтепродуктов в ДО является медиана ряда; его верхний квартиль служит критерием, по которому оценивается, находится ли полученное значение в пределах фона. Минимальное фоновое содержание нефтепродуктов – от 45 до 180 мг/кг (верхний предел 100–475 мг/кг) – характерно для речных и водохранилищных отложений. В озерных осадках, где в связи с гидрологическими и продукционными особенностями возрастает доля органического материала и тонкодисперсных частиц, фоновое содержание нефтепродуктов оценивается кратно большей величиной – 90–320 мг/кг, а верхние пределы фонового содержания – в 195–510 мг/кг.

**Ключевые слова:** нефтепродукты; фон; донные отложения; экологическое нормирование; водные объекты; статистический анализ.

## **D. V. Ivanov, V. S. Valiev, R. R. Shagidullin. STATISTICAL APPROACH TO ESTIMATING REGIONAL BACKGROUND CONCENTRATIONS OF PETROLEUM HYDROCARBONS IN SEDIMENTS**

Modern approaches to environmental regulation require that regional background concentrations of pollutants in environmental objects are set to serve as the basis for an objective assessment of the geoeological situation at a certain spatial level using monitoring data. The determination of the regional background levels of pollutants in sediments is particularly relevant due to the lack of matching sanitary standards for their permissible concentrations in the Russian Federation. Petroleum hydrocarbons, being structural components of natural organic matter, enter water bodies also from anthropogenic sources. Their accumulation in sediments leads to secondary water pollution and alteration of the structural and functional characteristics of the aquatic ecosystems. The natural component of petroleum hydrocarbons must be taken into account when determining their background levels in sediments. Based on representative material and using a statistical approach, the background concentrations of petroleum hydrocarbons in sediments of rivers, storage reservoirs and lakes of the Republic of Tatarstan were calculated. The structure of the variability in the content of petroleum hydrocarbons in the sediments is represented by the ratio of three factors: the hydrological conditions, organic matter content, and the particle size distribution (the pelite fraction content) of the sediments. The baseline value of the background concentration of petroleum hydrocarbons in sediments of water bodies in the Republic of Tatarstan is the median of the series, and its upper quartile serves as the criterion telling whether the value is within the regional background. Minimal background concentrations of petroleum hydrocarbons – 45 to 180 mg/kg (the upper limit of 100–475 mg/kg) – are typically found in the sediments of rivers and storage reservoirs. In lake sediments, where the proportion of organic matter and clay particles is higher due to hydrological and production characteristics, the background content of petroleum hydrocarbons is estimated to be much higher – 90–320 mg/kg, and the upper limits of the background content are 195–510 mg/kg.

**Key words:** petroleum hydrocarbons; background; sediments; environmental regulation; water bodies; statistical analysis.

### **Введение**

Одной из групп загрязняющих веществ, присутствующих в абиотических компонентах наземных и водных экосистем в качестве природных составляющих разнообразных органических соединений, с одной стороны, и накапливающихся в них в результате антропогенного воздействия, с другой, являются углеводороды, которые детектируются в природных объектах посредством физико-химического анализа как «нефтепродукты». Их концентрации в депонирующих средах (почвах и донных отложениях (ДО)) в Российской Федерации не нормируются, из-за чего возникает неопределенность при выполнении различного рода экологических и санитарно-гигиенических регламентов, требующих оценочных критериев состояния природных и урбанизированных территорий.

Для нефтедобывающих регионов оценка природной и антропогенной составляющих нефтяных углеводородов (НУ) в ДО представляет особую практическую значимость, так как именно она призвана обеспечивать принятие управленческих решений в сфере экологиче-

ской безопасности территорий и сохранения здоровья населения.

Сложность установления нормативов содержания НУ, накапливаемых в ДО, обусловлена отмеченным выше обстоятельством, что углеводороды не являются инородными для водных экосистем веществами, так как биота производит достаточно большое количество природных их аналогов – структурных компонентов органического вещества [Castaceda, Schouten, 2011; Pu et al., 2011; Паничева и др., 2012; Валиев и др., 2020].

Для пороговых оценок накопления загрязняющих веществ, в т. ч. НУ, в ДО на практике применяется три основных подхода, условно обозначаемых как статистический, токсикологический и биоиндикационный. Статистический подход основан на показателях варьирования содержания НУ в ДО; токсикологический (экспериментальный) подход ориентирован на токсикологические наблюдения за объектами биотестирования; в основу биоиндикационного подхода положен экологический принцип – оценка влияния исследуемых веществ на представителей трофических звеньев биоценоза и среду их обитания [Исаченко-Боме, Михайлова, 2008].

В последнее время в связи с активным развитием аналитической базы и экспресс-методов исследования широкое распространение получил статистический подход, который опирается на однозначно трактуемые статистические распределения концентраций НУ и статистические оценки факторов, способствующих их накоплению в ДО. В качестве подобных факторов чаще всего рассматривают два основных: содержание органического вещества (по потерям при прокаливании, ППП) [Михайлова, Исаченко-Боме, 2012; Паничева и др., 2012; Степанова и др., 2015; Garcia et al., 2019] и гранулометрический состав – как правило, содержание в ДО мелкодисперсных фракций [Московченко, 2001; Белкина и др., 2008; Исаченко-Боме, Михайлова, 2008; Белкина, 2011].

Иными словами, содержание НУ в отложениях характеризуется с позиций оценки их фактического содержания в различных диапазонах значений факторов влияния и статистическом анализе вариационных рядов с формированием их вероятностных (квантильных) характеристик. Квантильные характеристики вариационных рядов, полученные на достаточно большом фактическом материале, позволяют с высокой точностью предсказывать вероятности случайной величины (математическое ожидание) и выделять статистический порог (медианный критерий), выше и ниже которого случайная величина будет проявляться с равной вероятностью.

Безусловно, у каждого подхода есть свои достоинства и недостатки, поэтому и применять тот или иной подход следует в зависимости от целей и задач, для которых устанавливается оценочный порог. Однако без учета и статистической оценки основных факторов, обуславливающих накопление загрязняющих веществ в ДО, решить проблему нормирования невозможно.

В связи с тем, что концентрации биогенных углеродов могут достигать высоких величин, особенно в отложениях, богатых органическим веществом, а их количество значительно варьирует в зависимости от состава ДО, понятие «загрязнение нефтепродуктами» предполагает наличие порога, обозначающего пределы естественного содержания НУ в конкретных биоклиматических, гидрологических и геохимических условиях, т. е. фоновых концентраций в ДО. Строго говоря, разные типы водных объектов и даже отдельные водоемы характеризуются собственным естественным порогом, поэтому региональные фоновые концентрации нефтепродуктов должны иметь статистически обоснованную вероятностную оценку, указы-

вающую пределы, кратность превышения которых однозначно и пропорционально повышает вероятность того, что оцениваемые ДО загрязнены нефтью либо ее производными.

## Материалы и методы

Для реализации статистического подхода на 90 разнотипных водных объектах (водохранилища, реки, озера), расположенных на территории Республики Татарстан (РТ), в 2016–2019 гг. было отобрано 336 образцов поверхностных ДО. В образцах определяли гранулометрический состав, содержание органического вещества по ППП и содержание НУ (нефтепродуктов) методом ИК-спектрометрии по ПНД Ф 16.1:2.2.22–98.

Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета программ Statistica 6.0. Оценивались статистические характеристики вариационных рядов с расчетом их квантилей, средних значений и стандартных отклонений; для оценки различий между двумя независимыми выборками использовался U-критерий Манна – Уитни; корреляционные взаимосвязи оценивали коэффициентом корреляции Пирсона.

## Результаты и обсуждение

Статистический анализ позволил выявить прямые корреляционные связи как между накоплением НУ и величиной ППП, так и между содержанием в ДО НУ и частиц размером < 0,01 мм (пелитовой фракцией). В пределах диапазона наблюдаемых значений корреляционные связи были невысокими, хотя и статистически значимыми ( $p < 0,001$ ): для органического вещества  $r = 0,28$ , для пелита  $r = 0,26$ . Это является следствием нелинейного характера взаимосвязей между анализируемыми показателями, которые хорошо охватываются логарифмическими функциями (рис. 1).

Концентрации НУ выше 500 мг/кг имели место как при высоких, так и при низких значениях ППП, а также при самом разном содержании пелитовой фракции.

В связи с тем, что величина ППП, как косвенная характеристика всей совокупности природных и антропогенных органических веществ в составе ДО, включает в себя и определенное количество НУ, можно рассчитать их удельное содержание в составе органических соединений, формирующих величину ППП, по формуле:

$$НУ_{уд} = НУ_{абс} \cdot 100 \% / ППП,$$

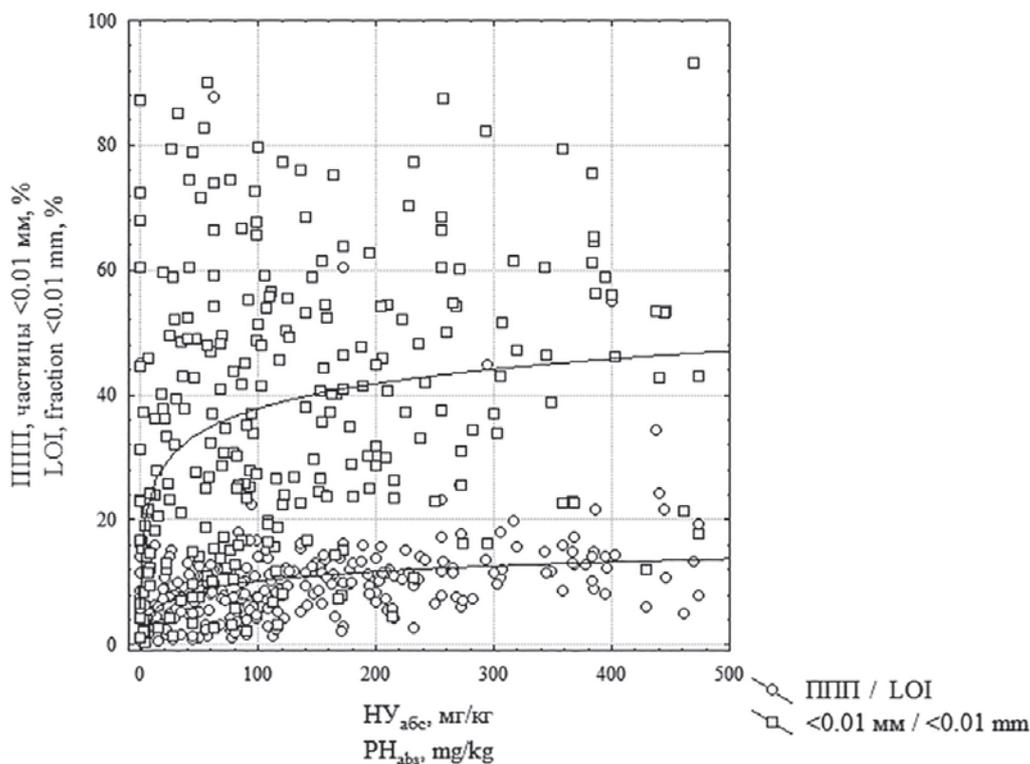


Рис. 1. Интерполяция взаимосвязи концентраций НУ с величиной ППП и содержанием частиц < 0,01 мм

Fig. 1. Interpolation of the correlation of petroleum hydrocarbons ( $PH_{abs}$ ) concentrations with loss of ignition (LOI) value and pelite fraction (< 0,01 mm) content

где  $НУ_{уд}$  – удельное содержание НУ, %;  $НУ_{абс}$  – абсолютное содержание НУ, мг/кг; ППП – величина потерь при прокаливании, в пересчете на мг/кг ДО.

Значение  $НУ_{уд}$  указывает на долю НУ в составе органического вещества отложений. Так, например, при величине ППП, равной 10 %, его содержание в ДО будет равно 100000 мг/кг. При концентрации НУ на уровне 1000 мг/кг их удельное содержание в ДО составит 1 %, т. е. из 10 % органического вещества 1 % следует отнести на вклад НУ.

В результате расчетов по выборке данных, характеризующих уровни содержания нефтепродуктов в ДО водных объектов РТ, были получены значения  $НУ_{уд}$ , медианный уровень которых составил 0,17 % (табл. 1). Выявлена неоднородность частотных характеристик, проявляющаяся в значительном стандартном отклонении параметров и асимметрии выборки в сторону больших значений. По мере роста содержания органического вещества  $НУ_{уд}$  плавно снижается, причем эта зависимость также является нелинейной (рис. 2). По всей видимости, с ростом ППП возрастает ошибка, характерная для данного косвенного метода определения содержания органического вещества, обусловленная

уменьшением веса образца после прокаливании за счет гидратов, карбонатов и других летучих соединений неорганической природы.

Учитывая, что содержание НУ в ДО тесно взаимосвязано с содержанием в них органического вещества, которое, в свою очередь, обусловлено дисперсным состоянием осадка, задача установления регионального фона НУ выполнялась с учетом изменчивости обоих показателей. Различия условий седиментации и накопления осадков в водотоках и водоемах влекут необходимость дифференцированной оценки пороговых значений НУ в ДО рек и водохранилищ, с одной стороны, и озер, с другой. Таким образом, в предлагаемой ниже модели структура изменчивости содержания НУ представлена соотношением трех факторов: 1) гидрологического режима, 2) содержания органического вещества и 3) гранулометрического состава осадков, выражаемого долей мелкодисперсных фракций (< 0,01 мм).

Наблюдаемая изменчивость содержания НУ в ДО была структурирована согласно данной модели и представлена вариационным распределением концентраций углеводородов в различных типах водных объектов и диапазонах детерминирующих факторов. В результате

Таблица 1. Вариационно-статистические параметры состава и свойств донных отложений

Table 1. Statistical parameters of the composition and properties of sediments

Показатель Index	Среднее Mean	Медиана Median	Нижний квартиль Low quartile	Верхний квартиль Upper quartile	Стандартное отклонение Standard deviation
ППП / LOI, %	10,7	9,8	6,0	13,2	8,7
<0,01 мм / <0,01 mm, %	38,1	37,9	22,5	53,2	20,8
НУ <sub>абс</sub> , мг/кг / PH <sub>абс</sub> , mg/kg	536,6	148,6	60,4	368,6	1214,7
НУ <sub>уд</sub> / PH <sub>р</sub> , %	0,50	0,17	0,07	0,38	1,00

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: ППП – потери при прокаливании, НУ<sub>абс</sub> – абсолютное содержание нефтяных углеводородов, НУ<sub>уд</sub> – удельное содержание нефтяных углеводородов.

Note. Here and in Tables 2, 3: LOI – loss of ignition, PH<sub>абс</sub> – absolute concentration of petroleum hydrocarbons, PH<sub>р</sub> – relative concentration of petroleum hydrocarbons.

структурирования получены выборки, отражающие колебания рассматриваемых показателей отложений рек и образованных на них водохранилищ и озерных отложений (табл. 2). ДО озер характеризовались более высокими значениями анализируемых показателей, что подтверждает структурную обособленность этих объектов и особую вариационную изменчивость их параметров.

В ранжированных вариационных рядах четко выделялась особенность структурной композиции двух выборок данных, разделенных по типу водного объекта: доля наблюдений в реках и водохранилищах возрастала быстрее при меньших градациях оцениваемого показате-

ля, в связи с чем и предельные значения этого показателя (охватывающие 100 % наблюдений) в указанных объектах существенно ниже. Кривые распределения двух выборок описывались одной и той же функцией, хотя и были значительно смещены относительно друг друга, поэтому для сравнительной характеристики вариационного распределения достаточно оценивать их выборочные квантили. В подобных случаях чаще всего определяют медиану (0,5 квантиль) и квартильный размах: нижний (0,25 квантиль) и верхний (0,75 квантиль) квартили. Медиану используют для задания порога, разделяющего выборку на диапазоны с относительно низкими и высокими значениями признака.

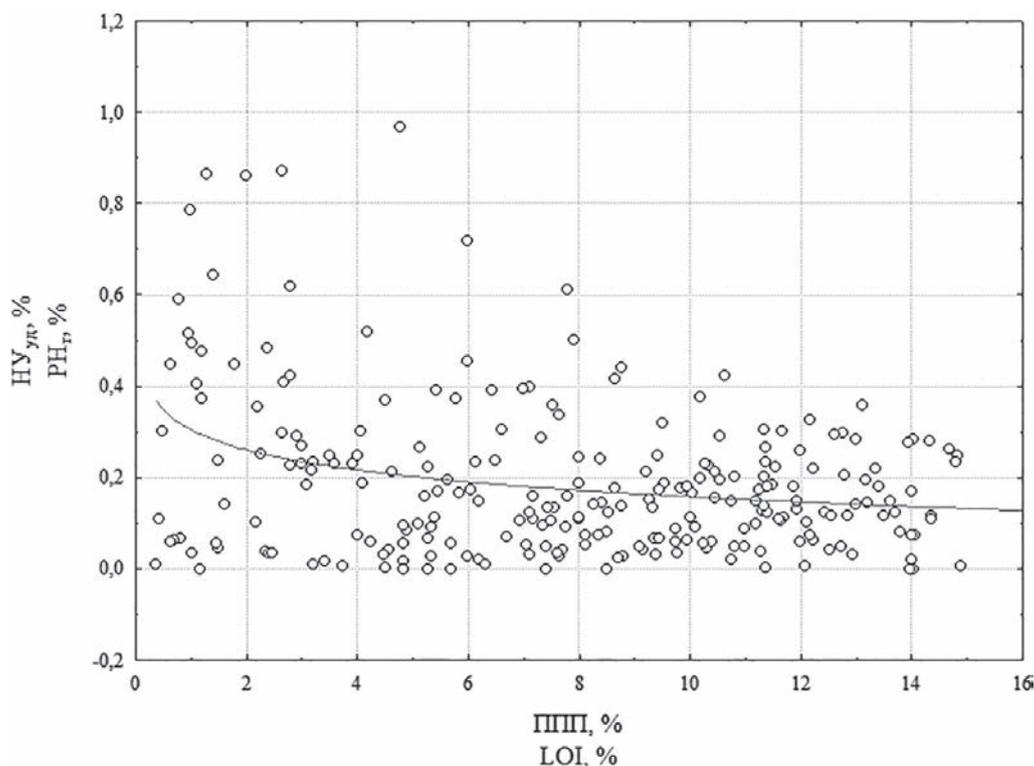


Рис. 2. Зависимость НУ<sub>уд</sub> от величины ППП

Fig. 2. The dependence of PH<sub>р</sub> on the value of LOI

Таблица 2. Вариационно-статистические параметры донных отложений разнотипных водных объектов

Table 2. Statistical parameters of sediments of diverse water bodies

Показатель Index	Среднее Mean	Медиана Median	Нижний квартиль Low quartile	Верхний квартиль Upper quartile	Стандартное отклонение Standard deviation
Реки и водохранилища / Rivers and reservoirs (n=180)					
ППП / LOI, %	8,4	7,6	4,6	11,3	6,7
<0,01 мм / <0,01 mm, %	31,0	30,8	16,5	41,9	16,8
НУ <sub>абс</sub> , мг/кг / PH <sub>абс</sub> , mg/kg	250,6	107,0	44,8	234,0	507,4
НУ <sub>уд</sub> / PH <sub>r</sub> , %	0,29	0,16	0,06	0,30	0,45
Озера / Lakes (n=156)					
ППП / LOI, %	13,2	11,6	8,8	14,7	10,0
<0,01 мм / <0,01 mm, %	45,7	48,4	27,7	60,3	22,2
НУ <sub>абс</sub> , мг/кг / PH <sub>абс</sub> , mg/kg	861,1	207,0	90,1	567,9	1633,3
НУ <sub>уд</sub> / PH <sub>r</sub> , %	0,73	0,19	0,09	0,51	1,35

В отложениях рек и водохранилищ можно выделить наблюдения, величины содержания ППП и фракции < 0,01 мм в которых ниже и выше 7,6 и 30,8 % соответственно (табл. 2). В осадках озер эти пороги равны 11,6 и 48,4 %. В результате округления пороговые значения ППП для рек и водохранилищ будут равны 8 %, для озер – 12 %, пороговые значения пелитовой фракции составят 30 и 50 % соответственно. С учетом указанных пороговых значений было сформировано 8 выборок ДО, охватывающих все наблюдения во всех возможных вариантах изменчивости значений ППП и пелитовой фракции, статистическая характеристика которых представлена в табл. 3.

При анализе статистического распределения концентраций НУ, характерных для тех или иных соотношений детерминирующих факторов, отмечены четкие тренды их возрастания по мере увеличения значений ППП и/или доли пелитовой фракции (табл. 3). Влияние частиц < 0,01 мм как корректирующего признака значимо проявляется при относительно низких уровнях органического вещества, при этом медианная концентрация НУ в тонкодисперсных отложениях кратно растет в сравнении с песчаными: в отложениях рек и водохранилищ – в 1,4 раза, в отложениях озер – в 2,5 раза. Напротив, при высоких концентрациях органического вещества вариации пелитовой фракции изменяют концентрацию НУ незначительно: медианное их содержание в ДО озер колеблется в пределах 313–319 мг/кг.

Такая же тенденция наблюдается и в осадках рек и водохранилищ: увеличение доли частиц < 0,01 мм на фоне высоких значений ППП ненамного повышает медианные концентрации НУ: с 162 до 181 мг/кг. Таким образом, в условиях относительно низкого уровня органического вещества дисперсный характер отло-

жений является особо значимым детерминирующим фактором, необходимым при оценке показателей накопления НУ.

При определении фоновых концентраций НУ, так же как и при установлении фоновых концентраций в ДО тяжелых металлов [Региональные..., 2019], в качестве диапазона характерных значений использовали квартильный размах (25 %, 75 %) анализируемых выборок, а их медиану рассматривали как математическое ожидание наиболее вероятного значения концентраций. Таким образом, базовым значением фоновых концентраций нефтепродуктов в ДО водных объектов РТ является медиана ряда ( $C_{\phi}$ ), а его верхний квартиль ( $C_{lim}$ ) служит в качестве оценочного критерия (табл. 4), по которому оценивается, находится ли полученное значение в пределах регионального фона.

Большая часть обследованных озер имеет статус особо охраняемых природных территорий, не подвергающихся техногенному воздействию. Из этого следует, что установленный по результатам расчетов более высокий фон нефтепродуктов в озерных отложениях обусловлен характером накопления в них природных углеводородов.

Оценивая неоднородность геохимических систем озер, рек и водохранилищ по «абсолютному разбросу» фонового содержания нефтепродуктов [Касимов, Власов, 2015], рассчитываемому как отношение максимального фона в глинистых отложениях с высоким содержанием органического вещества к минимальному фону в песчаных осадках с низким содержанием органики, следует отметить, что данный показатель изменялся от 3,6 (озера) до 4,0 (реки и водохранилища). Высокие показатели абсолютного разброса подтверждают правильность установления регионального фона НУ с учетом факторов, определяющих принадлежность от-

Таблица 3. Вариационно-статистические параметры выборок донных отложений

Table 3. Statistical parameters of sediments

Показатель Index	Число наблюдений Number of observation	Среднее Mean	Медиана Median	Нижний квартиль Low quartile	Верхний квартиль Upper quartile	Стандартное отклонение Standard deviation
Реки и водохранилища / Rivers and reservoirs						
ППП / LOI ≤ 8 %, ПФ / PF ≤ 30 %						
ППП / LOI, %	68	3,8	3,6	2,2	5,4	2,0
<0,01 мм / <0,01 mm, %	68	15,9	15,3	11,1	22,1	7,9
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	68	90,6	47,0	29,5	98,6	114,7
ППП / LOI ≤ 8 %, ПФ / PF > 30 %						
ППП / LOI, %	30	6,1	6,3	5,3	7,1	1,3
<0,01 мм / <0,01 mm, %	30	41,5	41,9	34,5	48,3	7,0
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	30	121,0	65,9	13,1	116,3	203,0
ППП / LOI > 8 %, ПФ / PF ≤ 30 %						
ППП / LOI, %	22	10,1	8,8	8,0	12,0	2,6
<0,01 мм / <0,01 mm, %	22	23,2	24,2	22,2	27,6	6,4
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	22	384,9	162,0	69,5	303,0	735,1
ППП / LOI > 8 %, ПФ / PF > 30 %						
ППП / LOI, %	60	13,1	11,3	9,4	14,0	8,5
<0,01 мм / <0,01 mm, %	60	46,2	41,9	37,1	54,2	11,5
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	60	482,6	181,0	116,2	474,0	748,3
Озера / Lakes						
ППП / LOI ≤ 12 %, ПФ / PF ≤ 50 %						
ППП, % / LOI, %	38	6,1	5,6	2,7	10,0	3,8
<0,01 мм, % / <0,01 mm, %	38	20,9	21,2	7,6	28,8	14,8
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	38	452,0	90,2	45,4	193,9	1368,3
ППП / LOI ≤ 12 %, ПФ / PF > 50 %						
ППП, % / LOI, %	42	9,4	9,6	8,1	11,0	1,6
<0,01 мм, % / <0,01 mm, %	42	63,5	61,8	55,3	68,3	10,1
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	42	940,3	221,5	91,9	345,0	910,4
ППП / LOI > 12 %, ПФ / PF ≤ 50 %						
ППП, % / LOI, %	40	17,9	14,7	13,3	19,3	8,5
<0,01 мм, % / <0,01 mm, %	40	34,8	40,2	26,6	43,5	12,3
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	40	979,0	313,0	120,0	459,0	958,7
ППП / LOI > 12 %, ПФ / PF > 50 %						
ППП, % / LOI, %	36	20,0	14,9	13,7	18,6	14,0
<0,01 мм, % / <0,01 mm, %	36	63,3	59,4	52,2	74,1	12,7
НУ <sub>abc</sub> , мг/кг / PH <sub>abs</sub> , mg/kg	36	811,0	319,1	122,5	512,5	1665,0

Примечание. Здесь и в табл. 4: ПФ – пелитовая фракция.

Note. Here and in Table 4: PF – pelite fraction.

ложений к тому или иному литогеохимическому типу.

Верхний предел фоновых значений  $C_{lim}$ , по отношению к которому устанавливается факт загрязнения ДО нефтепродуктами [Региональные..., 2020], превышает величину  $C_{\phi}$  для соответствующих типов отложений рек, водохранилищ и озер в среднем в 1,9 раза. Считается [Саеи и др., 1990], что концентрация загрязняющего вещества, в 1,5 раза превышающая фон, является минимально-аномальным со-

держанием, превосходящим природную вариацию и возможные ошибки опробования и аналитических исследований. Таким образом, значения верхнего предела фонового содержания нефтепродуктов в ДО водных объектов РТ обеспечивают надежный коэффициент запаса, который позволяет объективно оценить наличие загрязнения даже с учетом широкой вариативности региональных природных концентраций углеводородов в составе органического вещества ДО.

Таблица 4. Фоновое содержание нефтепродуктов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан, мг/кг [Региональные..., 2020]

Table 4. Background content of petroleum hydrocarbons ( $C_b$ ) in sediments of water bodies of the Republic of Tatarstan, mg/kg [Regional'nye..., 2020]

Характеристика ДО Sediments description	Фон $C_b$ Background $C_b$	Верхний предел Upper limit $C_{lim}$
Реки и водохранилища / Rivers and reservoirs		
Содержание ОВ < 8 %, содержание ПФ < 30 % Organic matter content < 8 %, PF content < 30 %	45	100
Содержание ОВ < 8 %, содержание ПФ > 30 % Organic matter content < 8 %, PF content > 30 %	65	115
Содержание ОВ > 8 %, содержание ПФ < 30 % Organic matter content > 8 %, PF content < 30 %	160	305
Содержание ОВ > 8 %, содержание ПФ > 30 % Organic matter content > 8 %, PF content > 30 %	180	475
Озера / Lakes		
Содержание ОВ < 12 %, содержание ПФ < 50 % Organic matter content < 12 %, PF content < 50 %	90	195
Содержание ОВ < 12 %, содержание ПФ > 50 % Organic matter content < 12 %, PF content > 50 %	220	345
Содержание ОВ > 12 %, содержание ПФ < 50 % Organic matter content > 12 %, PF content < 50 %	315	460
Содержание ОВ > 12 %, содержание ПФ > 50 % Organic matter content > 12 %, PF content > 50 %	320	510

Примечание. ОВ – органическое вещество

## Заключение

Структурно-вариационный метод оценки содержания НУ в ДО позволяет учесть особенности их распределения и накопления в зависимости от гранулометрического состава отложений, содержания в них органического вещества и типа водного объекта. В качестве структурных интервалов используются однозначно интерпретируемые параметры вариационной статистики, что позволяет использовать данный подход в качестве универсального методического обеспечения при установлении региональных фоновых концентраций нефтепродуктов в ДО.

По результатам исследования 90 водных объектов РТ с использованием методов вариационной статистики было установлено фоновое содержание нефтепродуктов в ДО, дифференцирующее природные показатели их накопления в осадках рек, образованных на них водохранилища и озера региона. Фоновые значения и верхние пределы природного содержания нефтепродуктов, превышение которых свидетельствует о наличии загрязнения, установлены с учетом доли органического вещества (биогенной составляющей) и пелитовой фракции в составе отложений.

Минимальное фоновое содержание нефтепродуктов – от 45 до 180 мг/кг (верхний предел 100–475 мг/кг) – характерно для речных и во-

дохранилищных отложений. В озерных осадках, где, в связи с гидрологическими и продукционными особенностями озер, возрастает доля органического материала и тонкодисперсных частиц, среднее фоновое содержание нефтепродуктов оценивается кратно большей величиной – 90–320 мг/кг, а верхние пределы фонового содержания – в 195–510 мг/кг.

Разработка и утверждение региональных нормативов содержания нефтепродуктов в ДО поверхностных водных объектов РТ решает целый комплекс актуальных природоохранных задач, связанных с ведением государственного мониторинга и с оценкой текущей экологической ситуации в водоемах республики, выявлением наиболее загрязненных акваторий и их отдельных участков, особенно в районах нефтедобычи. Наличие информации об уровнях и масштабах загрязнения водных объектов является необходимым звеном для включения в федеральные и региональные программы, направленные на их экологическую реабилитацию и благоустройство.

## Литература

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

Белкина Н. А., Рыжаков А. В., Тимакова Т. М. Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 4. С. 472–481.

Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р. Нефтяные углеводороды в донных отложениях: состав, идентификация, механизмы трансформации (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 1. С. 41–51.

Исаченко-Боме Е. А., Михайлова Л. В. Оценка состояния макрозообентоса реки Ватинский Еган, хронически загрязняемой нефтью // Современное состояние водных биоресурсов: Матер. междунар. конф. Новосибирск, 2008. С. 292–295.

Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. География. 2015. № 2. С. 7–17.

Михайлова Л. В., Исаченко-Боме Е. А. Разработка и апробация норматива содержания нефти в донных отложениях поверхностных водных объектов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 5. С. 530–542.

Московченко Д. В. Исследование состава донных отложений рек бассейна нижней Оби (в пределах Ханты-Мансийского автономного округа) // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2001. № 2. С. 138–142.

Паничева Л. П., Моисеенко Т. И., Кремлева Т. А., Волкова С. С. Биохимическая трансформация нефтяных углеводородов в водах Западной Сибири // Вестник Тюменского гос. ун-та. Сер. Экология. 2012. № 12. С. 38–48.

ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в мине-

ральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектromетрии.

Региональные нормативы «Фоновое содержание нефтепродуктов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан» (утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 3.02.2020 г. № 110-п).

Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан» (утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 27.03.2019 г. № 316-п).

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

Степанова Н. Ю., Латыпова Т. Р., Латыпова В. З. Экологически обусловленные пороговые уровни содержания нефтепродуктов в донных отложениях на примере Куйбышевского водохранилища // Нефтяное хозяйство. 2015. № 3. С. 106–109.

Castaceda I. S., Schouten S. A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments // Quat. Sci. Rev. 2011. Vol. 30. P. 2851–2891.

Garcia M. R., Cattani A. P., da Cunha Lana P., Figuera R. C. L., Martins C. C. Petroleum biomarkers as tracers of low-level chronic oil contamination of coastal environments: A systematic approach in a subtropical mangrove // Environ. Pollut. 2019. Vol. 249. P. 1060–1070.

Pu Y., Zang H. C., Wang Y. L., Lei G. L., Nace T., Zhang S. P. Climatic and environmental implications from n-alkanes in glacially eroded lake sediments in Tibetan Plateau: An example from Ximen Co // Chinese Sci. Bull. 2011. Vol. 56, no. 14. P. 1503–1510.

Поступила в редакцию 25.05.2020

## References

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogenykh elementov v ozernykh ekosistemakh [The role of bottom sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 35–41.

Belkina N. A., Ryzhakov A. V., Timakova T. M. Raspreделение i transformatsiya neftyanykh uglevodorodov v donnykh otlozheniyakh Onezhskogo ozera [Distribution and transformation of petroleum hydrocarbons in bottom sediments of Lake Onega]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2008. Vol. 35, no. 4. P. 472–481.

Isachenko-Bome E. A., Mikhailova L. V. Otsenka sostoyaniya makrozoobentosa reki Vatinskii Egan, khronicheski zagryaznyayemoi nef't'yu [Assessment of the macrozoobenthos status of the Vatin'sky Egan River, chronically polluted by oil]. *Sovr. sostoyanie vodnykh bioresursov: Mat. mezhdunar. konf.* [The current state of aquatic biological resources: Proceed. int. conf.]. Novosibirsk, 2008. P. 292–295.

Kasimov N. S., Vlasov D. V. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimi [Clarks of chemical elements as reference standards in environ-

mental geochemistry]. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. Geografiya* [MSU Bull. Geography Ser.]. 2015. No. 2. P. 7–17.

Mikhailova L. V., Isachenko-Bome E. A. Razrabotka i aprobatsiya normativa soderzhaniya nef'ti v donnykh otlozheniyakh poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov [Development and testing of the standard for oil content in bottom sediments of surface water bodies]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2012. Vol. 39, no. 5. P. 530–542.

Moskovchenko D. V. Issledovanie sostava donnykh otlozhenii rek basseina nizhnei Obi (v predelakh Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga) [Study of the composition of bottom sediments of the rivers of the lower Ob basin (within the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug)]. *Vestnik ekol., lesovedeniya i landshaftovedeniya* [Bull. of ecol., forestry, and landscape sci.]. 2001. No. 2. P. 138–142.

Panicheva L. P., Moiseenko T. I., Kremleva T. A., Volkova S. S. Biokhimicheskaya transformatsiya nef'tyanykh uglevodorodov v vodakh Zapadnoi Sibiri [Biochemical transformation of petroleum hydrocarbons in the waters of Western Siberia]. *Vestnik Tyumenskogo gos. univ. Ser. ekol.* [Bull. Tyumen St. Univ. Ecol. Ser.]. 2012. No. 12. P. 38–48.

ПНД Ф 16.1: 2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных,

organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii [Method for measuring the mass fraction of oil products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by IR spectrometry].

*Regional'nye normativy "Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov Respubliki Tatarstan" (utv. Prikazom Ministerstva ekologii i prirodnykh resursov RT ot 27.03.2019 g. № 316-p)* [Regional standards *Background content of heavy metals in bottom sediments of surface water bodies of the Republic of Tatarstan* (approved by the Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan No. 316-p dated 27.03.2019)].

*Regional'nye normativy "Fonovoe sodержanie nefteproduktov v donnykh otlozheniyakh poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov Respubliki Tatarstan" (utv. Prikazom Ministerstva ekologii i prirodnykh resursov RT ot 3.02.2020 g. № 110-p)* [Regional standards *Background content of oil products in bottom sediments of surface water bodies of the Republic of Tatarstan* (approved by the Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan No. 110-p dated 3.02.2020)].

Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Environmental geochemistry]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

Stepanova N. Yu., Latypova T. R., Latypova V. Z. Ekologicheski obuslovlennyye porogovyе urovni sodер-

zhaniya nefteproduktov v donnykh otlozheniyakh na primere Kuibyshevskogo vodokhranilishcha [Ecologically determined threshold levels of oil products in bottom sediments on the example of the Kuibyshev reservoir]. *Neftyanoё khozyaistvo* [Oil Industry]. 2015. No. 3. P. 106–109.

Valiev V. S., Ivanov D. V., Shagidullin R. R. Neftyanye uglevodorody v donnykh otlozheniyakh: sostav, identifikatsiya, mekhanizmy transformatsii (obzor) [Petroleum hydrocarbons in bottom sediments: composition, identification, transformation mechanisms (review)]. *Ross. zhurn. priklad. ekol.* [Russ. J. Appl. Ecol.]. 2020. No. 1. P. 41–51.

Castaceda I. S., Schouten S. A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments. *Quat. Sci. Rev.* 2011. Vol. 30. P. 2851–2891.

Garcia M. R., Cattani A. P., da Cunha Lana P., Figueira R. C. L., Martins C. C. Petroleum biomarkers as tracers of low-level chronic oil contamination of coastal environments: A systematic approach in a subtropical mangrove. *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 249. P. 1060–1070.

Pu Y., Zang H. C., Wang Y. L., Lei G. L., Nace T., Zhang S. P. Climatic and environmental implications from n-alkanes in glacially eroded lake sediments in Tibetan Plateau: An example from Ximen Co. *Chinese Sci. Bull.* 2011. Vol. 56, no. 14. P. 1503–1510.

Received May 25, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н. Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087  
эл. почта: water-rf@mail.ru  
тел.: (843) 2759573

### Валиев Всеволод Сергеевич

старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087  
эл. почта: podrost@mail.ru

### Шагидуллин Рифгат Роальдович

директор, чл.-корр. АН РТ, 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

## CONTRIBUTORS:

### Ivanov, Dmitry

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences 28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: water-rf@mail.ru

### Valiev, Vsevolod

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences 28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: podrost@mail.ru

### Shagidullin, Rifgat

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences 28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: shagidullin\_@mail.ru

УДК 556.114.7: 546.21: 543.632. 14

## СООТВЕТСТВИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДОЛГОСРОЧНОЙ КИНЕТИКИ БПК КОНЦЕНТРАЦИЯМ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ИЗ РАЗНЫХ АКВАТОРИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

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

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

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

Длительные БПК-эксперименты (до 84–126 сут) и определение концентраций компонентов органического вещества (ОВ) проводились в различные сезоны 2013–2017 гг. в воде Онежского озера. Пробы воды отбирали из акваторий Пухтинской, Кондопожской, Петрозаводской губ, а также из устьевой зоны р. Шуи и в районе Ивановских островов из поверхностного горизонта (0,5 или 1 м) или из разных горизонтов толщи воды (от поверхности до дна). Выполнено одновременно по 16 экспериментов при 20 и 10 °С и по 8 – при 10 и 2 °С (всего 48 экспериментов). Развитие БПК во всех экспериментах отражено кинетическими уравнениями разного типа и соответствующими параметрами, отражающими также и особенности кинетики БПК в среднем по сезонам года на I-й, II-й и линейной стадиях. Средние значения параметров БПК в весенней и летней воде из исследованных акваторий Онежского озера оказались выше в сравнении с их значениями в воде из центральной части озера. Показано, что в водах окраинных акваторий озера на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ и на линейной стадии окисления условно «стойких» фракций ОВ потребление  $O_2$  в разные сезоны выше соответственно в 2,5–4,2 и в 2 раза в сравнении с центральной частью озера. Это служит дополнительным подтверждением, что воды центральной части озера сохраняют высокое качество. Между различными компонентами ОВ и кинетическими параметрами БПК установлена тесная связь ( $R^2 = 0,60–1,00$ ).

**Ключевые слова:** биохимическое потребление кислорода; константа скорости / скорость потребления кислорода; качество воды; органическое вещество; взаимосвязи между показателями органического вещества и БПК; Онежское озеро.

### **A. V. Leonov, M. V. Zobkova. CORRESPONDENCE BETWEEN THE PARAMETER VALUES OF LONG-TERM BOD KINETICS AND CONCENTRATIONS OF ORGANIC MATTER COMPONENTS IN WATERS FROM DIFFERENT REGIONS OF LAKE ONEGO**

Long-term BOD experiments (up to 84–126 days) were conducted and the concentrations of organic matter compounds were determined in different seasons of 2013–2017 with water taken from different parts of Lake Onego: Pukhta, Kondopoga, Petrozavodsk Bays, as well as the estuarine zone of the River Shuya and the area around Ivanovskie Islands. Water samples were taken either from the surface horizon (0.5 or 1 m) or from

different water column horizons (from the surface to the bottom). In total, 48 experiments were held: 16 experiments were performed simultaneously for 20 and 10 °C, and eight – for 10 and 2 °C, respectively. The development of BOD in all the experiments was modeled by various types of kinetic equations with parameters that also reflect season-averaged characteristics of BOD kinetics in the first, second and linear stages. The average spring and summer values of water BOD parameters in the above-listed regions of Lake Onego were higher than the values in water from the Central region of the lake. It was shown that O<sub>2</sub> consumption in the lake's peripheral water areas at the first stage of oxidation of labile organic components and in the linear stage of oxidation of conventionally "stable" organic fractions in different seasons was, respectively, 2.5–4.2 and 2 times higher compared to the Central part of the lake. This is additional evidence of the high water quality retained in the Central region. Strong correlation was found between different organic matter components and BOD kinetic parameters ( $R^2 = 0.60\text{--}1.00$ ).

**Key words:** biochemical oxygen demand; rate constant / oxygen consumption rate; water quality; organic matter; crosstalk between organic matter and BOD parameters; Lake Onego.

## Введение

Онежское озеро – один из крупнейших водоемов в мире с запасом пресных вод 291,2 км<sup>3</sup>. Площадь его поверхности составляет 9692 км<sup>2</sup>, и 25 % приходится на заливы, губы и прибрежные акватории [Швец, 1977]. Средняя глубина озера 30 м, наибольшая – 129 м, 57 % площади озера составляют глубины 20–60 м и 10 % отводится литорали в пределах изобаты 10 м. Прибрежная береговая зона северной части озера сильно изрезана, включает большое количество заливов, губ, островов, а южная – напротив, имеет слабую расчлененность побережья и включает заболоченные участки. Химический состав воды Онежского озера определяется преимущественно поступлением речных вод с водосбора, атмосферными осадками, подземным и антропогенным стоком [Сабылина и др., 2010]. Естественное качество озерных вод в целом формируется под выраженным антропогенным воздействием, связанным с использованием водных ресурсов, хозяйственной деятельностью на водосборе и сбросом загрязненных (или недостаточно очищенных) сточных вод в природные водные объекты [Экосистема..., 1990].

Источники загрязнения распределены неравномерно в бассейне Онежского озера. Наиболее существенные из них расположены в северной его части, где находятся большие промцентры (города Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск). Заливы и губы подвержены влиянию притоков, воды которых по большей части обогащены гумусовыми веществами (ГВ), железом, компонентами сточных вод из промузлов. В этих водах может быть сильно изменен естественный химический состав компонентов – повышено содержание взве-

шенных веществ, нефтепродуктов, увеличены цветность воды, значения окисляемости и биохимического потребления кислорода (БПК), концентрации  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$ , а трофический статус вод этих акваторий имеет признаки мезо- и эвтрофного состояния [Экосистема..., 1990].

Результаты анализа кинетических параметров по длительным БПК-опытам позволили установить, что для воды из центрального плеса (ЦП) Онежского озера характерны пониженные значения БПК на I-й и линейной стадиях процесса [Леонов, Зобкова, 2020]. Это служит дополнительным критерием сохранения высокого качества воды в этом районе озера. Данная работа будет сосредоточена на результатах анализа длительных БПК-опытов с водой из разных акваторий Онежского озера, в частности, из мелководной Пухтинской губы (ПХ), Кондопожской губы (КГ), устьевой зоны р. Шуи (РШ), Петрозаводской губы (ПГ) и из района Ивановских островов (ИО). Это позволит оценить качество воды в акваториях, а также сравнить результаты с ранее установленными параметрами для центрального плеса Онежского озера.

Органическое вещество (ОВ) в природных водах подразделяется в зависимости от происхождения на автохтонное (образуется в водоемах в основном за счет фитопланктона) и аллохтонное (образуется на водосборе и поступает в природные воды с речным стоком и со сточными водами). В состав автохтонного ОВ в незагрязненных природных водах включаются биохимически легко окисляемые соединения – такие, как свободные углеводы, липиды, белки, мочевины и другие вещества, а в состав аллохтонного – гумусовые вещества [Ефремова, Зобкова, 2019]. Также необходимо отметить, что в ряде исследований выявлена роль во внутриводоемных продукцион-

но-деструкционных процессах взвешенного ОВ, влияние которого увеличивается с ростом уровня трофии водоема [Ostapenia et al., 2009; Верес, Остапеня, 2011].

В последние годы тест на БПК для долгосрочных исследований практически не применяется, а если и используется, то только для измерения БПК за 5 суток ( $BPK_5$ ). Так как отдельные измерения  $BPK_5$  малоинформативны, то вполне обоснованны критические высказывания о целесообразности его оценки.

В то же время БПК служит одним из критериев оценки содержания в природной воде ОВ, поэтому несомненно интересно сравнить и выявить соответствие друг другу значений концентраций разных форм ОВ и важнейших кинетических параметров, установленных по долгосрочным определениям БПК. Необходимое условие корректности такого сравнения – в каждой выборке должны быть результаты, которые получены при анализе проб воды с полным совпадением даты, места и горизонта отбора пробы воды для БПК-опытов и для аналитических определений концентраций ОВ.

Таким образом, важной целью данного исследования на примере разных акваторий Онежского озера является: 1) проверка перспективности использования долгосрочных тестов БПК для объяснения особенностей мультстадийных окислительных процессов в воде; 2) установление взаимосвязей между различными компонентами ОВ (углеводами, липидами, белками, ГВ), присутствующими в природных водах, и параметрами, полученными по долгосрочным БПК-экспериментам.

## Объекты и методы исследований

Исследуемые районы Онежского озера отличаются друг от друга по различным показателям: расположением, объемом водных масс, глубинами, водообменом с центральной частью озера, химическим составом. Такое отличие может влиять на качество воды и изменение показателей по кинетике БПК в них.

**Пухтинская губа** расположена на юго-западном берегу Онежского озера и отличается активным водообменом с центральным плесом озера. Химический состав губы изменяется в зависимости от времени года, особенно это заметно в весенний период при возникновении термобара, который препятствует водообмену с озерными водами. Это приводит к тому, что в губу поступают и аккумулируются в ней воды РШ и более мелких притоков с заболоченных территорий, богатые ОВ аллохтонного происхождения, склоновые паводковые

воды [Бояринов, Петров, 1991], а также теплые сточные воды Петрозаводского промузла. Поэтому весной возрастают значения показателей ОВ: так, в 2013 г. цветность составляла 45–65 град., перманганатная окисляемость (ПО) – 12,5–19,6 мг О/л, а содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) – 9,1–14,7 мг С/л [Сабылина, Рыжаков, 2018]. Летом и осенью главное влияние на качество воды в ПХ оказывают озерные водные массы – содержание  $C_{орг}$  в эти сезоны в губе и центре озера практически не различалось [Сабылина, Рыжаков, 2018]. Содержание  $P_{общ}$  также уменьшается от весны к осени, и вода в ПХ относится мезотрофному типу.

**Устье р. Шуи** расположено в вершинной части ПГ. Река является вторым по величине притоком Онежского озера (3,1 км<sup>3</sup>/год), ее сток во многом определяет качество вод и состояние акватории ПГ. С водами РШ поступает существенное количество ГВ, это связано с обилием лесов, болот и озер на ее водосборе. Многолетние наблюдения позволили выявить постепенный рост поступления в озеро ОВ с ее водами: в 1965–1966 гг. среднегодовое содержание  $C_{орг}$  составляло 12,3 мг/л, а в 2007–2008 гг. – 16,8 мг/л [Сабылина, 2016].

**Петрозаводская губа** составляет 1,3 % общей площади Онежского озера, отличается высокой проточностью (период водообмена в ней с учетом внешнего водообмена с озером – 0,13 [Лозовик и др., 2019]) и значительной природной и антропогенной нагрузкой, которая в целом выше, чем для КГ [Сабылина, 2015]. Современный мезотрофный мезогумусный статус вод ПГ формируется при смешении озерных, речных и сточных вод [Сабылина и др., 2010], поэтому значения показателей ОВ могут сильно варьировать. Весной в ПГ превалирует ОВ гумусовой природы, что связано с запирианием вод РШ, а летом преобладают озерные воды, это подтверждается меньшим содержанием  $C_{орг}$  и ГВ в ней [Ефремова, Зобкова, 2019]. Кроме того, установлено, что в результате климатических изменений в ПГ с 1990-х гг. возрастают значения показателей содержания ОВ терригенного происхождения [Калинкина и др., 2019; Kalinkina et al., 2020]. Так, цветность увеличилась с 56 до 73 град., содержание Fe – с 0,12 до 0,42 мг/л,  $P_{общ}$  – с 12 до 22 мкг/л и взвешенного вещества – с 1,6 до 3 мг/л [Калинкина и др., 2019].

**Ивановские острова** расположены на выходе из ПГ и образуют естественную преграду между губой и открытой частью озера. Качество воды в этом районе больше соответствует озерной.

**Кондопожская губа** является одним из крупнейших и глубоководных районов озера

и в отличие от Петрозаводской характеризуется меньшей проточностью, период ее водообмена с учетом внешнего водообмена с озером составляет 1,02 [Лозовик и др., 2019]. В вершинную часть губы поступают воды р. Суны (95 % через Кондопожский канал), а также сточные воды Кондопожского промцентра: 90 % – Кондопожского ЦБК (в среднем 53–54 м<sup>3</sup>/год) и 10 % – хозяйственно-бытовые стоки г. Кондопоги [Сабылина, Рыжаков, 2007]. Сточные воды комбината распространяются в средней толще водных масс в виде факела [Сабылина и др., 2010] и локализуются в этой акватории [Лозовик и др., 2003]. Анализ многолетнего ряда наблюдений (1965–2008 гг.) показал, что содержание  $C_{орг}$  и  $P_{общ}$  в воде р. Суны оставалось довольно постоянным и за указанный период в среднем составляло 8,4–10,7 мг/л и 12–13 мкг/л соответственно [Сабылина, 2016]. Речные воды разбавляют сточные воды ЦБК, включающие быстро окисляемые компоненты ОВ (спирты, фурфурол, альдегиды, сахара), а также биохимически трудно окисляемые лигносульфонаты (составляют 50–60 % всей органической массы), смолистые и другие вещества. В зависимости от сезона характер загрязнения вод КГ сточными водами ЦБК разли-

чен. Воды вершинной части КГ отличаются высокими концентрациями ОВ, а в середине и во внешней ее части по качеству и составу они близки к озерным [Сабылина, 2015].

Отбор проб воды для исследования долгосрочной кинетики БПК осуществлялся из разных акваторий Онежского озера в 2013–2017 гг. (рис. 1). Всего выполнено 48 экспериментов (8 при 10 и 2 °С и 16 при 20 и 10 °С). С зимней водой проведено 12 БПК-экспериментов, с весенней – 14, с летней – 10, с осенней – 12. Варианты отбора и составления интегральных проб воды для опытов по БПК, а также их условного подразделения на шесть серий показаны в хронологическом порядке в табл. 1. Необходимо отметить, что для установления зависимостей дополнительно были использованы также данные по кинетике БПК и содержанию ОВ в воде из РШ и ЦП озера (отбор проб на станции С3).

С водой из разных акваторий Онежского озера, испытывающих разное антропогенное воздействие (из мелководной ПХ, крупных акваторий – КГ и ПГ, из устьевой зоны РШ и района ИО), проведены длительные (до 84–126 сут) эксперименты для изучения кинетики БПК с анализом проб воды через 3, 7, 14, 21, 35, 49,

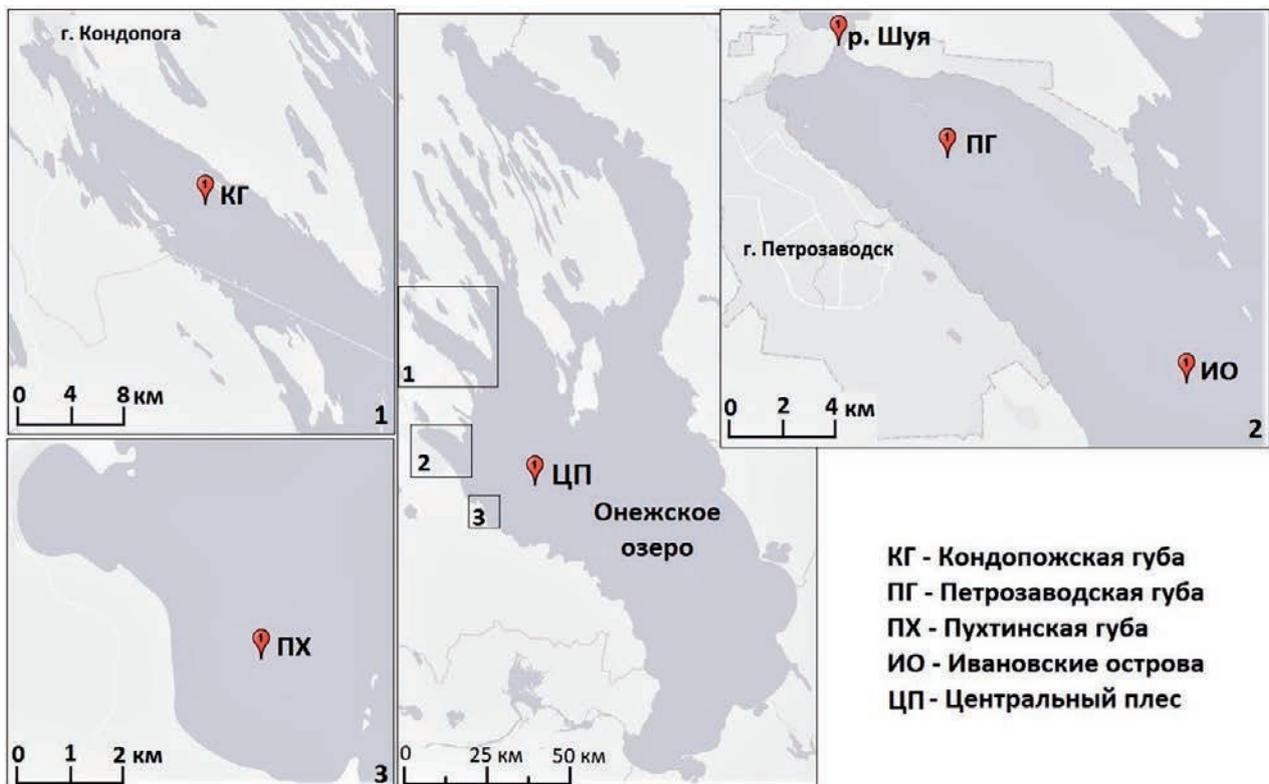


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб в разных акваториях Онежского озера в 2013–2017 гг.

Fig. 1. Schematic map of sampling stations in different areas of Lake Onego in 2013–2017

Таблица 1. Схема отбора проб воды из разных акваторий Онежского озера в разные гидрологические сезоны 2013–2017 гг.

Table 1. Plan of the water sampling from different areas of Lake Onego in 2013–2017

Серия опытов Series of experiments	Акватория озера (станция, глубина, м) Area of the lake (station, depth, m)	Сезон, год Season, year	Тип пробы (горизонт, м) Sample type (horizon, m)
1	Пухтинская губа / Pukhta Bay (GP1; 13,5)	весна–осень spring–autumn 2013	поверхностный surface (0,5)
2	Кондопожская губа Kondopoga Bay (K6; 82,0)	зима winter 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 20,0 + 40,0 + 60,0 + 80,0)
		весна spring 2013	поверхностный surface (1,0)
		лето summer 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 33,0 + 64,0)
		осень autumn 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 40,0 + 80,0)
3	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,7)	зима winter 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
		весна spring 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
		лето summer 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
		осень autumn 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 25,0)
4	Ивановские о-ва Ivanovskie Islands (-; 32,0)	зима winter 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 8,0 + 15,0 + 31,0)
		весна–осень spring–autumn 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 15,0 + 31,0)
5	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 29,0)	зима winter 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 10,0 + 24,0)
		весна spring 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 27,0)	лето summer 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 25,0)
		осень autumn 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
6	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 25,0)	зима, весна winter, spring 2016	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 12,0 + 24,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 26,5)	осень autumn 2016	поверхностный surface (1,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,0)	зима winter 2017	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,5)	весна spring 2017	поверхностный surface (1,0)

70, 91 и 126 сут. Полученные в экспериментах мультистадийные БПК-кривые обрабатывались, и для каждой выделенной стадии оценивались значения кинетических параметров БПК [Леонов и др., 2018].

Характеристику ОВ в пробах определяли по химическому потреблению кислорода (ХПК) [РД..., 2012] в воде перед началом эксперимента (ХПК<sub>0</sub>), на 49-е сут (ХПК<sub>49</sub>) и по его окончании (ХПК<sub>126</sub>), а также по содержанию С<sub>орг</sub> [Зобков, Зобкова, 2015] и ПО в исходной воде. Ряд параметров ОВ оценивали по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного С (С<sub>лаб</sub> = 0,3 · [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup>), стабильного С (С<sub>стаб</sub> = С<sub>орг</sub> - С<sub>лаб</sub>), С<sub>орг</sub> в зависимости от общего содержания ОВ (ОВ<sub>2</sub>) или его доли в условно «стойкой» фракции (ОВ<sub>стаб</sub>) (С<sub>орг</sub><sup>l</sup>, мг С = 2,15 · ОВ мг) [Бульон, 1983]. В этих зависимостях использованы такие же обозначения параметров, как и в данной работе. Кроме того, для сравнения параметров, полученных по кинетике БПК, использованы опубликованные ранее [Ефремова, Зобкова, 2019] данные по концентрации белков, липидов, углеводов и ГВ, установленные для ЦП, ПГ и РШ осенью 2016 г. и зимой–летом 2017 г.

## Результаты и обсуждение

В этой серии экспериментов, как и в ранее обсуждаемых с интегральными пробами воды из центра Онежского озера [Леонов, Зобкова, 2020], получены мультистадийные БПК, в которых развитие потребления O<sub>2</sub> на окисление содержащихся в исследуемых водах компонентов ОВ может быть воспроизведено кинетическими уравнениями разного типа [Леонов, 1974]. Эти типы уравнений и кинетические параметры БПК, оцениваемые при обработке первичных экспериментальных наблюдений, подробно обсуждаются в [Леонов, Зобкова, 2019]. В результате анализа полученных данных для шести серий опытов установлены значения кинетических параметров БПК:  $k$  – константа скорости БПК на I-й стадии, сут<sup>-1</sup>;  $w_1$  – константа скорости БПК на II-й стадии, (л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>);  $v_1$ ,  $\omega_s$  – соответственно скорости БПК на I-й стадии и на линейном участке БПК, мг O<sub>2</sub>/(л·сут); [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>ll</sup> – предельные значения БПК соответственно на I-й и II-й стадиях, мг O<sub>2</sub>/л;  $\omega_s \cdot 126$  – общее потребление O<sub>2</sub> на линейной стадии, мг O<sub>2</sub>/л; БПК<sub>полн</sub> – БПК полное, то есть суммарное потребление O<sub>2</sub> по выделенным стадиям, мг O<sub>2</sub>/л (табл. 2).

Далее рассмотрены значения кинетических параметров БПК, полученные при обработке данных экспериментов с пробами воды

из мелководной и глубоководных акваторий Онежского озера. Основная цель анализа этой информации – выявить отличия в значениях параметров БПК в воде из разных акваторий и горизонтов при температурах 20, 10 и 2 °С, а также в различные сезоны 2013–2017 гг. Расчетные кинетические уравнения для разных типов БПК-кривых в сравнении с экспериментальными данными для обсуждаемых серий экспериментов приведены на рис. 2–7.

### *Серия 1: данные экспериментов с водой из Пухтинской губы (2013 г., весна, лето, осень)*

Эксперименты выполнялись с пробами воды, отобранными в период открытой воды 2013 г. из поверхностного горизонта (табл. 1). Развитие БПК в экспериментах с весенней водой при 20 и 10 °С описывается уравнениями EL-типа, а с летней и осенней водой – уравнениями AL-типа (рис. 2).

Кинетика I-й стадии БПК в весенней и летней воде отражена соответственно уравнениями E- и A-типа, а в формах БПК-кривых при разных температурах есть небольшие отличия (рис. 2). Параметры уравнения E-типа при 20 и 10 °С в весенней воде были близки:  $k$  – 0,115 и 0,111 (в среднем 0,113) сут<sup>-1</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup> – 0,80 и 0,75 (0,78) мг O<sub>2</sub>/л и  $v_1$  – 0,0922 и 0,0833 (0,088) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). В то же время скорость БПК на линейной стадии  $\omega_s$  при 20 °С была в 4,1 раза выше, чем при 10 °С.

В целом значения параметров БПК на I-й стадии в летней воде были выше, чем в осенней. Так,  $w_1$  при 20 °С в летней воде составляло 0,579, а в осенней – 0,293 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup> – 1,41 и 0,613 мг O<sub>2</sub>/л соответственно. Однако параметры  $v_1$  и  $\omega_s$  были близки по значениям, которые составили 0,0215 и 0,0345 (в среднем 0,0281) и 0,0212 и 0,0177 (0,0195) мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. Такая же тенденция сохранялась и при 10 °С: летом значения параметров I-й стадии БПК превышали установленные для осенней воды (табл. 2).

В экспериментах с летней водой значения скоростей БПК были достаточно близки в уравнениях A-типа при 20 и 10 °С:  $v_1$  – 0,0215 и 0,0182 (в среднем 0,0198),  $\omega_s$  – 0,0212 и 0,0194 (0,0203) мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а в осенней воде близки параметры  $w_1$  – 0,293 и 0,321 (0,307) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>. Значения других параметров в летней и осенней воде отличались при разных температурах (табл. 2).

Очевидное влияние температуры обнаруживается при сравнении скоростей БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в экспериментах с весенней

Таблица 2. Сводная таблица кинетических параметров БПК, оцененных для разных акваторий Онежского озера в 2013–2017 гг. (над чертой – данные для экспериментов при 20 °С, под чертой – при 10 °С)

Table 2. Summary table of BOD kinetic parameters evaluated for different areas of Lake Onego in 2013–2017 (above the line – data for experiments at 20 °С, below the line – data for experiments at 10 °С)

Район озера, год, сезон, рисунок (тип отбора пробы**) Part of the lake, year, season, figure (sampling type**)	Кинетические БПК-параметры Kinetic BOD parameters								
	I-я стадия (по E- или A-типу) First stage (E- or A-type)			L-стадия L-stage		II-я стадия Second stage	БПК <sub>полн</sub> BOD <sub>total</sub>		
	Тип БПК BOD type	[O <sub>2</sub> ]', мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L	k, сут <sup>-1</sup> или w1, л·мг <sup>-1</sup> ·сут <sup>-1</sup> k, day <sup>-1</sup> or w1, L·mg <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup>	v <sub>1</sub> , мг O <sub>2</sub> (л·сут) mg O <sub>2</sub> (L·day)	ω <sub>s</sub> , мг O <sub>2</sub> (л·сут) mg O <sub>2</sub> (L·day)	ω <sub>s</sub> ·126, мг O <sub>2</sub> /л ω <sub>s</sub> ·126, mg O <sub>2</sub> /L	[O <sub>2</sub> ]', мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L	Расчет Calculated	Опыт Experiment
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КГ, 2013, З Рис. 3, а (2) KG, 2013, W Fig. 3, а (2)	E	0,43	0,148	0,0636	0,0132	1,663	0,44	2,533	2,52
	E	0,28	0,173	0,0484	0,00875	1,103	0,23	1,613	1,61
ПГ, 2013, З Рис. 4, а (2) PB, 2013, W Fig. 4, а (2)	E	0,38	0,131	0,0498	0,0268	3,377	–	3,76	3,76
	E	0,32	0,092	0,0295	0,0115	1,449	–	1,77	1,77
ИО, 2015, З Рис. 5, а (2) Ил, 2015, W Fig. 5, а (2)	E*	0,232	0,119	0,0276	0,00325	0,410	–	0,642	0,65
	E	0,114	0,131	0,0183	0,00690	0,869	–	0,983	1,01
ПГ, 2015, З Рис. 6, а (2) PB, 2015, W Fig. 6, а (2)	A*	0,16	0,309	0,0008	0,00724	0,912	–	0,928	0,92
	E	0,16	0,115	0,0184	0,0076	0,958	–	1,118	1,12
ПГ, 2016, З Рис. 7, а (2) PB, 2016, W Fig. 7, а (2)	E	3,335	0,138	0,4600	0,0228	2,873	1,585	7,793	7,86
	E	0,50	0,091	0,0455	0,0142	1,789	–	2,289	2,29
ПГ, 2017, З Рис. 7, г (2) PB, 2013, W Fig. 7, г (2)	E	0,39	0,138	0,0538	0,0370	4,662	–	5,052	5,05
	E	0,23	0,0968	0,0223	0,0177	2,230	–	2,460	2,46
ПХ, 2013, В Рис. 2, а (1) РкВ, 2013, Sp Fig. 2, а (1)	E	0,80	0,115	0,0920	0,0228	2,873	–	3,673	3,67
	E	0,75	0,111	0,0833	0,0056	0,706	–	1,458	1,46
КГ, 2013, В Рис. 3, б (1) КВ, 2013, Sp Fig. 3, б (1)	E	1,95	0,130	0,2540	0,0368	4,637	–	6,587	6,58
	E	1,80	0,0876	0,1260	–	–	1,76	3,560	3,58
ПГ, 2013, В Рис. 4, б (2) PB, 2013, Sp Fig. 4, б (2)	E	1,50	0,103	0,1550	0,0286	3,604	0,71	5,814	5,81
	E	0,79	0,139	0,1100	0,00935	1,178	0,57	2,538	2,55
ИО, 2015, В Рис. 5, б (2) Ил, 2015, Sp Fig. 5, б (2)	E*	0,313	0,175	0,0548	0,00098	0,123	–	0,436	0,44
	E	0,78	0,0922	0,0748	0,00314	0,396	–	1,176	1,18
ПГ, 2015, В Рис. 6, б (2) PB, 2015, Sp Fig. 6, б (2)	E*	0,42	0,125	0,0525	0,00429	0,541	–	0,961	0,96
	E	0,64	0,115	0,0736	0,0142	1,789	–	2,429	2,43
ПГ, 2016, В Рис. 7, б (2) PB, 2016, Sp Fig. 7, б (2)	E	1,00	0,0988	0,0988	0,0254	3,200	0,847	5,047	5,02
	A	0,85	0,247	0,2100	0,0121	1,543	0,481	2,873	2,88

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПГ, 2017, В Рис. 7, д (2) РВ, 2017, Sp Fig. 7, д (2)	<u>Е</u> Е	<u>1,00</u> 0,85	<u>0,120</u> 0,0876	<u>0,1200</u> 0,0745	<u>0,0214</u> 0,00867	<u>2,696</u> 1,092	<u>1,24</u> –	<u>4,936</u> 1,942	<u>4,94</u> 1,94
ПХ, 2013, Л Рис. 2, б (1) РкВ, 2013, Sm Fig. 2, б (1)	<u>А</u> А	<u>1,410</u> 0,785	<u>0,579</u> 0,392	<u>0,0215</u> 0,0182	<u>0,0212</u> 0,0194	<u>2,671</u> 2,444	–	<u>4,081</u> 3,229	<u>4,07</u> 3,23
КГ, 2013, Л Рис. 3, в (2) КВ, 2013, Sm Fig. 3, в (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,63</u> 0,43	<u>0,175</u> 0,125	<u>0,1100</u> 0,0537	<u>0,0158</u> 0,0133	<u>1,991</u> 1,676	<u>0,553</u> –	<u>3,174</u> 2,106	<u>3,17</u> 2,10
ПГ, 2013, Л Рис. 4, в (2) РВ, 2013, Sm Fig. 4, в (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,22</u> 0,15	<u>0,101</u> 0,101	<u>0,0222</u> 0,0151	<u>0,0178</u> 0,0069	<u>2,243</u> 0,869	<u>0,353</u> 0,324	<u>2,816</u> 1,343	<u>2,81</u> 1,34
ИО, 2015, Л Рис. 5, в (2) Ил, 2015, Sm Fig. 5, в (2)	<u>А*</u> А	<u>0,13</u> 0,65	<u>0,305</u> 0,315	<u>0,0005</u> 0,0113	<u>0,0070</u> 0,00838	<u>0,882</u> 1,056	<u>0,325</u> –	<u>1,337</u> 1,706	<u>1,33</u> 1,71
ПГ, 2015, Л Рис. 6, в (2) РВ, 2015, Sm Fig. 6, в (2)	<u>Е*</u> Е	<u>0,158</u> 0,42	<u>0,129</u> 0,111	<u>0,0204</u> 0,0466	<u>0,00724</u> 0,00514	<u>0,912</u> 0,648	<u>–</u> 0,732	<u>1,070</u> 1,800	<u>1,05</u> 1,80
ПХ, 2013, О Рис. 2, в (1) РкВ, 2013, А Fig. 2, в (1)	<u>А</u> А	<u>0,613</u> 0,409	<u>0,293</u> 0,321	<u>0,0345</u> 0,0034	<u>0,0177</u> 0,00629	<u>2,230</u> 0,793	–	<u>2,843</u> 1,203	<u>2,84</u> 1,20
КГ, 2013, О Рис. 3, г (2) КВ, 2013, А Fig. 3, г (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,57</u> 0,30	<u>0,150</u> 0,0922	<u>0,0855</u> 0,0277	<u>0,0138</u> –	<u>1,739</u> –	<u>0,33</u> 0,677	<u>2,639</u> 0,977	<u>2,62</u> 0,97
ПГ, 2013, О Рис. 4, г (2) РВ, 2013, А Fig. 4, г (2)	<u>А</u> А	<u>1,149</u> 0,64	<u>0,225</u> 0,281	<u>0,0657</u> 0,0304	<u>0,0105</u> 0,00857	<u>1,323</u> 1,080	<u>0,72</u> 0,48	<u>3,192</u> 2,200	<u>3,18</u> 2,20
ИО, 2015, О Рис. 5, г (2) Ил, 2015, А Fig. 5, г (2)	<u>А*</u> Е	<u>0,39</u> 0,46	<u>0,347</u> 0,130	<u>0,0005</u> 0,0598	<u>0,00461</u> 0,00692	<u>0,581</u> 0,872	<u>0,310</u> 0,254	<u>1,281</u> 1,586	<u>1,28</u> 1,58
ПГ, 2015, О Рис. 6, г (2) РВ, 2015, А Fig. 6, г (2)	<u>А*</u> А	<u>0,20</u> 0,60	<u>0,334</u> 0,360	<u>0,0023</u> 0,0428	<u>0,0078</u> 0,00835	<u>0,983</u> 1,052	<u>0,547</u> 0,596	<u>1,730</u> 2,248	<u>1,73</u> 2,25
ПГ, 2016, О Рис. 7, в (1) РВ, 2016, А Fig. 7, в (1)	<u>А</u> А	<u>1,691</u> 1,087	<u>0,363</u> 0,339	<u>0,3139</u> 0,1500	<u>0,0247</u> 0,0121	<u>3,112</u> 1,525	–	<u>4,803</u> 2,612	<u>4,80</u> 2,60

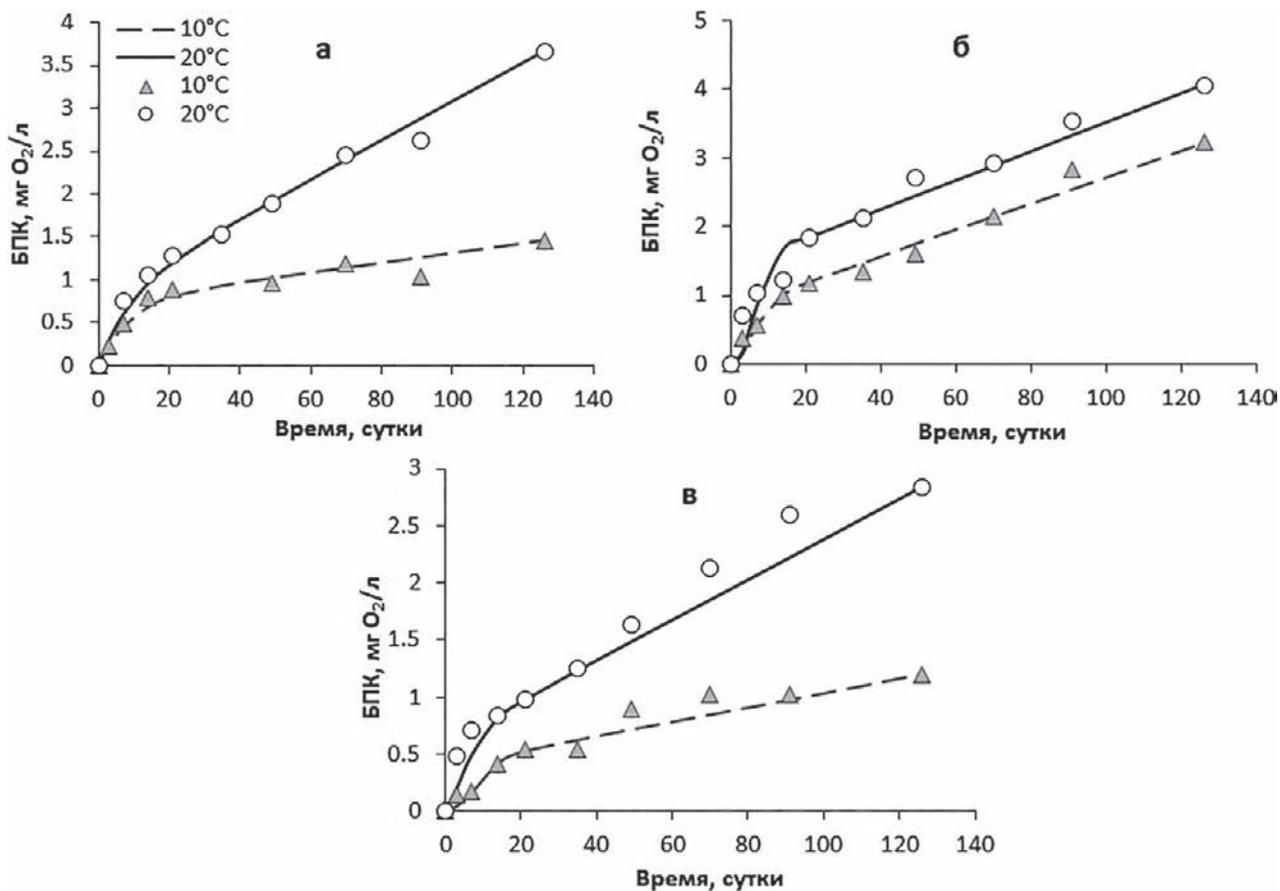
Примечание. \* Эксперимент при 2 °С; \*\* здесь и в табл. 3 указан тип отбора проб воды: (1) – из поверхностного горизонта 0,5 или 1 м, (2) – интегральная, от поверхности до дна; прочерк – отсутствие данных; З, В, Л, О – соответственно зима, весна, лето, осень.

Note. \* Data for experiments at 2 °С; \*\* here and in Table 3 sampling type: (1) – surface 0.5 or 1 m, (2) – integral, from the surface to the bottom; W, Sp, Sm, A – respectively winter, spring, summer, autumn; KB, PB, PkВ, Ил – respectively Kondopoga Bay, Petrozavodsk Bay, Pukhta Bay and Ivanovskie Islands.

и осенней водой: при 20 °С значения составляют соответственно 0,0228 и 0,0177, а при 10 °С – 0,0056 и 0,00629 мг О<sub>2</sub>/(л·сут), что в 4,1 и 2,8 раза ниже. Напротив, в летней воде, как отмечено выше, скорости БПК на линейной стадии достаточно близки при 20 и 10 °С.

*Серия 2: данные экспериментов с водой из Кондопожской губы (2013 г., зима, весна, лето, осень)*

Вода для БПК-экспериментов при 20 и 10 °С отбиралась из КГ на станции К6 зимой, летом



**а) 20 °С – EL:**  $BPK = 0,80 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0228 t$   
**10 °С – EL:**  $BPK = 0,75 (1 - e^{-0,111t}) + 0,0056 t$

**б) 20 °С – AL:**  $BPK = 0,0263 (e^{0,579t} - 1) / (1 + 0,0187e^{0,579t}) + 0,0212 t$   
**10 °С – AL:**  $BPK = 0,0593 (e^{0,392t} - 1) / (1 + 0,0755e^{0,392t}) + 0,0194 t$

**в) 20 °С – AL:**  $BPK = 0,192 (e^{0,293t} - 1) / (1 + 0,313e^{0,293t}) + 0,0177 t$   
**10 °С – AL:**  $BPK = 0,0255 (e^{0,321t} - 1) / (1 + 0,0623e^{0,321t}) + 0,00629 t$

Рис. 2. BPK-кривые в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °С с водой из Пухтинской губы: **а** – весна, **б** – лето; **в** – осень.

Здесь и далее под рисунками – уравнения для разных BPK-кривых; обозначения расчетных кривых и экспериментальных данных по BPK на фрагментах **б**, **в** и рис. 3, 4, 7 – см. фрагмент **а**

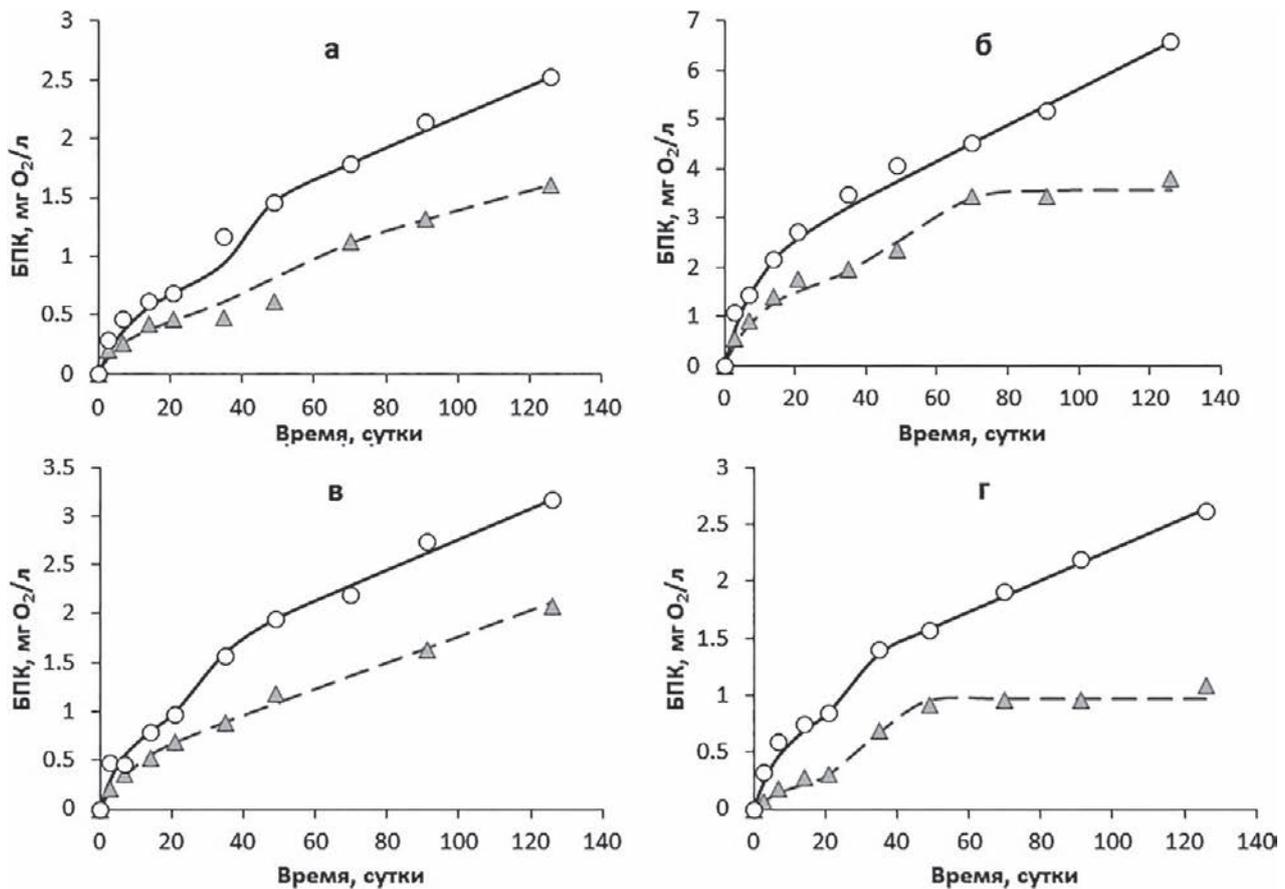
Fig. 2. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °С with water from Pukhta Bay: **а** – spring, **б** – summer; **в** – autumn.

Hereinafter below the figures – different BOD-curve equations; designations of BOD calculated curves and experimental data in fragments **б**, **в** and Fig. 3, 4, 7 – see fragment **а**

и осенью в виде интегральной пробы (из разных горизонтов от поверхности до дна), а весной – из горизонта 1 м (табл. 1). Кинетика BPK-экспериментов из КГ (рис. 3) при 20 °С отражена уравнениями EAL-типа в зимней, летней и осенней воде и EL-типа – в весенней воде, а при 10 °С – EAL-типа в зимней воде, EA-типа – в весенней и осенней воде и EL-типа – в летней воде.

При анализе полученных данных установлено, что такие параметры BPK (по E-типу), как  $k$ ,  $[O_2]'$

и  $v_1$ , для различных сезонов при 20 и 10 °С имеют близкие значения (табл. 2). Поэтому средние значения этих параметров могут служить своеобразной характеристикой сезонов года. Так,  $k$  были выше зимой и летом (соответственно 0,161 и 0,150 сут<sup>-1</sup>) и ниже весной и осенью (0,109 и 0,121 сут<sup>-1</sup>). Зимой, летом и осенью выявлены близкие значения  $[O_2]'$  – 0,355–0,530 мг O<sub>2</sub>/л и  $v_1$  – 0,0560–0,0819 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а весной они были повышены и достигали соответственно 1,875 мг O<sub>2</sub>/л и 0,206 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).



**а)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,43 (1 - e^{-0,148t}) + (0,00537e^{0,130t} - 1) / (1 + 0,0122e^{0,130t}) + 0,0132t$   
 10 °С – EAL:  $BPK = 0,28 (1 - e^{-0,173t}) + (1,293 \cdot 10^{-4} e^{0,150t} - 1) / (1 + 5,623 \cdot 10^{-4} e^{0,150t}) + 0,00875t$

**в)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,63 (1 - e^{-0,175t}) + 4,04 \cdot 10^{-4} (e^{0,239t} - 1) / (1 + 7,31 \cdot 10^{-4} e^{0,239t}) + 0,0158t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,43 (1 - e^{-0,125t}) + 0,0133t$

**б)** 20 °С – EL:  $BPK = 1,95 (1 - e^{-0,130t}) + 0,0368t$   
 10 °С – EA:  $BPK = 1,80 (1 - e^{-0,0876t}) + (0,00312e^{0,123t} - 1) / (1 + 0,00177e^{0,123t})$

**г)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,57 (1 - e^{-0,150t}) + 3,01 \cdot 10^{-7} (e^{0,462t} - 1) / (1 + 9,12 \cdot 10^{-7} e^{0,462t}) + 0,0138t$   
 10 °С – EA:  $BPK = 0,30 (1 - e^{-0,0922t}) + 5,34 \cdot 10^{-4} (e^{0,211t} - 1) / (1 + 7,89 \cdot 10^{-4} e^{0,211t})$

Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °С с водой из Кондопожской губы.

Здесь и на рис. 4–6: **а** – зима; **б** – весна, **в** – лето; **г** – осень

Fig. 3. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °С with water from Kondopoga Bay.

Here and in Fig. 4–6: **а** – winter, **б** – spring, **в** – summer, **г** – autumn

Развитие II-й стадии БПК (по А-типу) фиксировалось в зимней и осенней воде при 20 и 10 °С, в весенней – только при 10 °С, а в летней – только при 20 °С. Так, при 20 °С отмечены следующие значения кинетических параметров:  $w_2$  – 0,130 и 0,462 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и  $[O_2]''$  – 0,44 и 0,33 мг O<sub>2</sub>/л, а при 10 °С:  $w_2$  – 0,150 и 0,211 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и  $[O_2]''$  – 0,230 и 0,677 мг O<sub>2</sub>/л. Как видно, параметры II-й стадии БПК существенно отличались при разных температурах по сезонам года. В то же время значения предельного БПК были близки на I-й и II-й стадиях при 20 °С в зимней и летней воде, а при 10 °С – в зимней и весенней воде (табл. 2).

Весной значение предельного БПК в воде из горизонта 1 м было повышенным на I-й стадии БПК при 20 и 10 °С (соответственно 1,95 и 1,80 мг O<sub>2</sub>/л), а также на II-й стадии при 10 °С (1,76 мг O<sub>2</sub>/л), что служит доказательством и подтверждением лабильности свежееобразованного в весенний период автохтонного ОВ, на окисление которого расходуются повышенные количества растворенного O<sub>2</sub>. Есть и свои особенности изменения скоростей БПК на линейной стадии: значения  $\omega_s$  в зимней воде отличались при 20 и 10 °С и составили 0,0132 и 0,00875, а в летней были близки – 0,0158 и 0,0133 (в среднем 0,0146) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Весной и осенью при 20 °С скорость БПК достигала

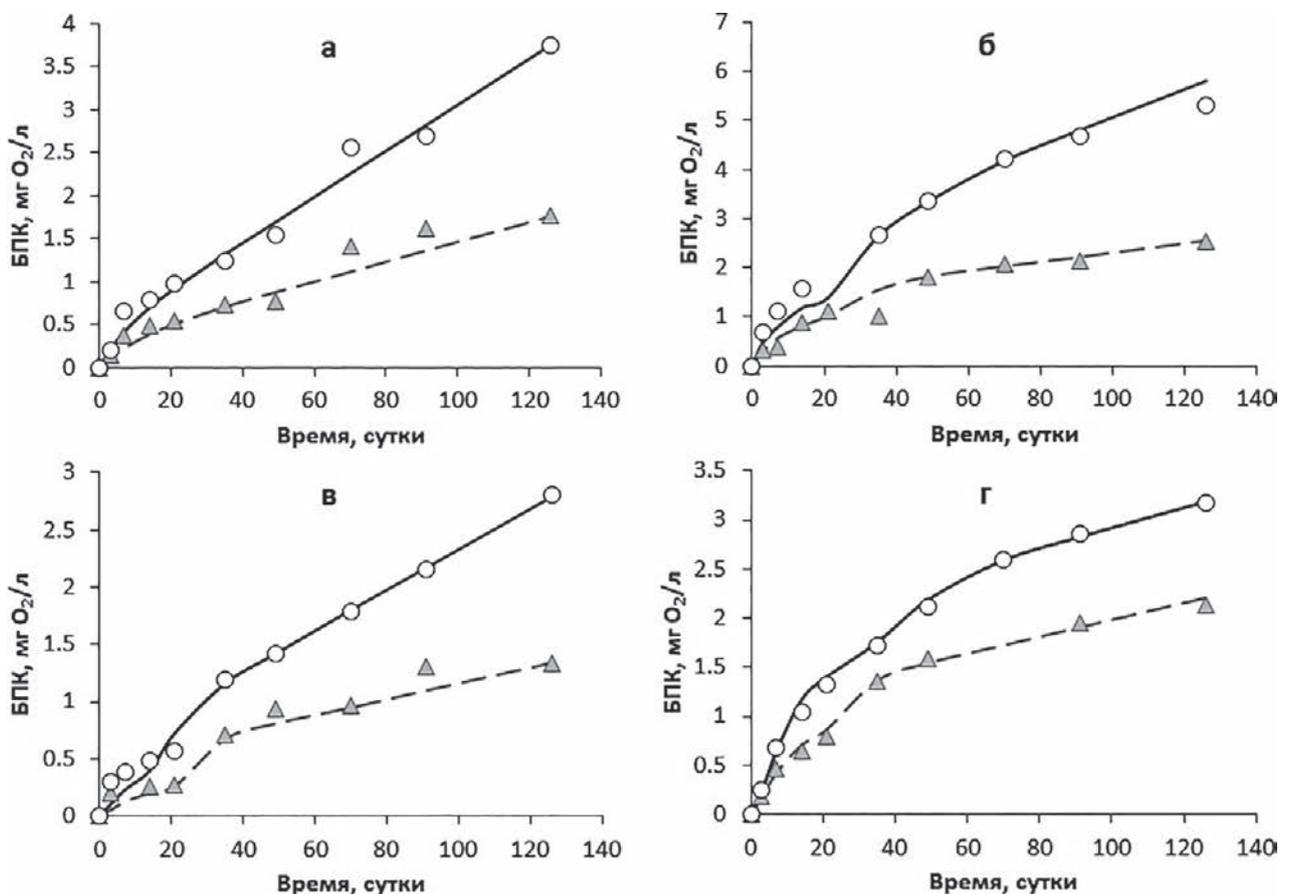
0,0368 и 0,0138 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Таким образом, наибольшая скорость БПК на линейной стадии отмечалась в весенней воде при 20 °С, тогда как в остальных экспериментах значения ω<sub>s</sub> были сопоставимы. Близкие значения скорости БПК при 20 °С в зимней, летней и осенней воде – свидетельство того, что в указанные сезоны интегральная проба воды, составленная из порций воды, отбираемых от поверхности до дна из разных горизонтов, содержит однотипное по свойствам ОВ, скорости окисления которого сопоставимы.

Следует отметить важный факт: весной при 10 °С и наличии в воде растворенного O<sub>2</sub> не зафиксировано его потребления после 70-х сут, а осенью – после 40-х сут (рис. 3). Так как при 10 °С во всех экспериментах с водой из других акваторий отмечалось развитие БПК, то причи-

на остановки развития БПК на линейной стадии должна исследоваться в специальных экспериментах.

*Серия 3: анализ данных экспериментов с водой из Петрозаводской губы (2013 г., зима, весна, лето, осень)*

Вода из ПГ для экспериментов отбиралась на станции Р2 из разных горизонтов от поверхности до дна в виде интегральной пробы (табл. 1). Развитие БПК в воде из ПГ при 20 и 10 °С представлено уравнениями EL-, EAL-, EAL- и AAL-типов соответственно зимой, весной, летом и осенью (рис. 4). При 20 и 10 °С в зимней воде из ПГ I-я стадия БПК развивается по E-типу, а в воде из устья РШ – по A-типу, в остальные сезоны типы уравнений для описа-



**а)** 20 °С – EL: БПК = 0,380 (1 – e<sup>-0,131t</sup>) + 0,0268 t  
 10 °С – EL: БПК = 0,320 (1 – e<sup>-0,0922t</sup>) + 0,0115 t

**в)** 20 °С – EAL: БПК = 0,22 (1 – e<sup>-0,101t</sup>) + 0,000623 (e<sup>0,302t</sup> – 1) / (1 + 0,00177e<sup>0,302t</sup>) + 0,0178 t  
 10 °С – EAL: БПК = 0,15 (1 – e<sup>-0,101t</sup>) + 5,22·10<sup>-8</sup> (e<sup>0,512t</sup> – 1) / (1 + 1,61·10<sup>-7</sup> e<sup>0,512t</sup>) + 0,0069 t

**б)** 20 °С – EAL: БПК = 1,50 (1 – e<sup>-0,103t</sup>) + 0,00391 (e<sup>0,119t</sup> – 1) / (1 + 0,0055e<sup>0,119t</sup>) + 0,0286 t  
 10 °С – EL: БПК = 0,79 (1 – e<sup>-0,139t</sup>) + 0,000576 (e<sup>0,226t</sup> – 1) / (1 + 0,00101e<sup>0,226t</sup>) + 0,00935 t

**г)** 20 °С – AAL: БПК = 0,254 (e<sup>0,225t</sup> – 1) / (1 + 0,221e<sup>0,225t</sup>) + 0,0046 (e<sup>0,124t</sup> – 1) / (1 + 0,00639 e<sup>0,124t</sup>) + 0,0105 t  
 10 °С – AAL: БПК = 0,169 (e<sup>0,281t</sup> – 1) / (1 + 0,264e<sup>0,281t</sup>) + 1,49·10<sup>-4</sup> (e<sup>0,286t</sup> – 1) / (1 + 3,10·10<sup>-4</sup> e<sup>0,286t</sup>) + 0,00857 t

Рис. 4. Развитие БПК в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °С с водой из Петрозаводской губы

Fig. 4. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °С with water from Petrozavodsk Bay

ния I-й стадии БПК в этих смежных акваториях совпадали.

В экспериментах с водой при 20 °С БПК в зимней, весенней и летней воде на I-й стадии описано уравнением E-типа. Параметры БПК в зимней и летней воде были близки: значения  $k$  достигали 0,131 и 0,101 (в среднем 0,116) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,38 и 0,22 (0,30) мг O<sub>2</sub>/л, а  $v_1$  – 0,0498 и 0,0222 (0,0360) мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. Отметим, что значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  весной были соответственно в 5 и 4,3 раза выше средних показателей для зимнего и летнего сезонов (табл. 2, рис. 4).

Также близки были значения параметров БПК зимой и летом при 10 °С. Так, среднее значение  $k$  составило 0,0966 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,24 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0223 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), и в целом они были ниже полученных весной в 1,4; 3,4 и 4,9 раза соответственно. Достаточно сходными были средние значения констант скорости БПК,  $k$ , зимой и летом при разных температурах (табл. 2), а значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  – выше весной (1,15 мг O<sub>2</sub>/л и 0,133 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно) и гораздо ниже летом ( $[O_2]'$  – 0,19 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0187 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)).

Осенью I-я стадия (по A-типу) отражена при 20 и 10 °С параметрами:  $w_1$  – 0,225 и 0,281 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 1,149 и 0,64 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0657 и 0,0304 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

Развитие II-й стадии БПК (по A-типу) отмечено при 20 и 10 °С в весенней, летней и осенней воде. Значения параметров БПК при 20 °С меняются в пределах:  $w_2$  – 0,119–0,302 (в среднем 0,215) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 0,352–0,72 (0,594) мг O<sub>2</sub>/л. Колебания параметров в экспериментах при 10 °С составляют:  $w_2$  – 0,226–0,512 (в среднем 0,341) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 0,324–0,57 (0,458) мг O<sub>2</sub>/л. При 20 °С значения  $w_2$  были ниже, а  $[O_2]''$  – выше, чем при 10 °С.

Общие пределы изменения скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в разные сезоны 2013 г. составляли: при 20 °С – 0,0105–0,0286 (в среднем 0,0199) и при 10 °С – 0,0056–0,0115 (0,0091) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Повышенные значения  $\omega_s$  фиксировались весной (20 °С) и зимой (10 °С), а пониженные – осенью (20 °С) и летом (10 °С).

В воде смежной акватории, устьевой зоны РШ, за период опыта потребление O<sub>2</sub> было выше, чем в воде из ПГ: при 20 °С в зимней, весенней, летней и осенней воде превышение составило соответственно 2,2; 1,5; 2,8 и 2,2 раза, а при 10 °С – 2,6; 2,3; 7,9 и 1,9 раза. В воде из РШ при 20 °С в ходе эксперимента расходовался практически весь O<sub>2</sub> (7,08–8,20 мг O<sub>2</sub>/л), в весенней и летней воде это отмечено на 70-е и 21-е сут соответственно. При 10 °С весь O<sub>2</sub> расходовался за 126 сут только в летней воде

(10,53 мг O<sub>2</sub>/л), в другие сезоны расход O<sub>2</sub> в опытах составлял 3,80–5,86 мг O<sub>2</sub>/л.

*Серии 4 и 5: данные экспериментов при 10 и 2 °С с водой из акваторий Ивановских островов и Петрозаводской губы (2015 г., зима, весна, лето, осень)*

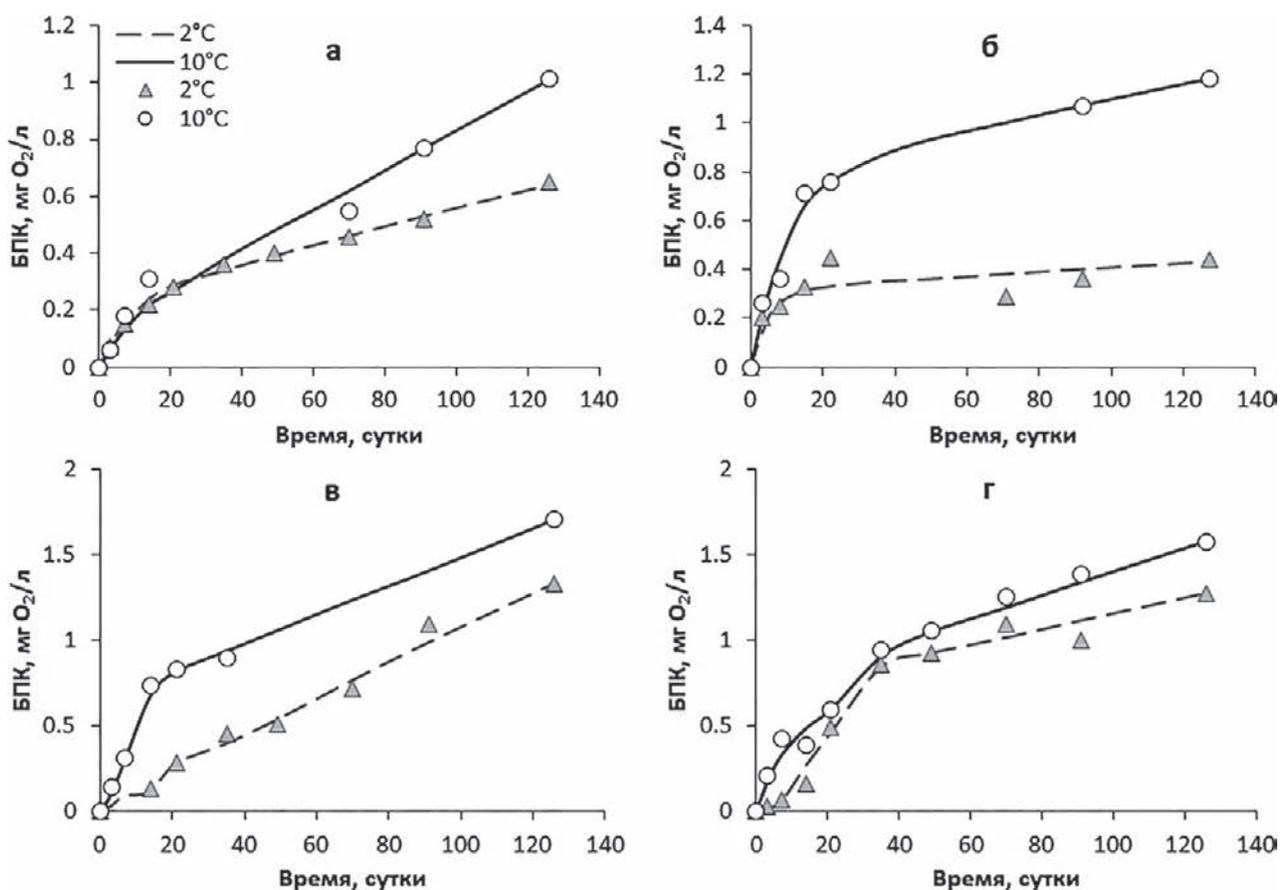
Эксперименты проводились с интегральными пробами, отбираемыми во все сезоны 2015 г. в акваториях ИО и ПГ (ст. P2) из всего столба воды (табл. 1). Полученные в экспериментах БПК-кривые и уравнения, их описывающие, показаны соответственно на рис. 5 и 6.

При 10 °С в зимней и весенней воде из указанных акваторий кинетика БПК представлена уравнениями EL- и AL-типа, а в экспериментах летом и осенью – соответственно уравнениями AL- и EAL-типа в воде из ИО и EAL- и AAL-типа в воде из ПГ. Наложение БПК-кривых друг на друга при 10 и 2 °С с начала экспериментов в зимней и весенней воде из акватории ИО – свидетельство близких свойств имеющегося в воде автотрофного ОВ к окислению при низких температурах (рис. 5, а, б).

Сравнение кинетических параметров показывает, что в воде из ИО при 10 °С развитие I-й стадии БПК (по E-типу) в зимней, весенней и осенней воде характеризуют близкие значения параметров  $k$  и  $v_1$ , которые в среднем составили соответственно 0,118 сут<sup>-1</sup> и 0,050 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

В результате экспериментов установлено, что типы БПК-кривых в разные сезоны в воде из ИО отличаются, поэтому значения предельного БПК I-й стадии  $[O_2]'$  изменялись в диапазоне 0,14–0,78 (в среднем 0,51) мг O<sub>2</sub>/л. В то же время скорости БПК на линейном участке для лета и осени при 10 °С были близки ( $\omega_s$  – 0,00838 и 0,0069, в среднем 0,0074 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)), хотя средняя скорость в 2,4 раза выше скорости, оцененной для весеннего периода.

Развитие I-й стадии БПК (по E-типу) в зимней, весенней и летней воде из ПГ (рис. 6) описывали значения  $k$  в диапазоне 0,111–0,115 (в среднем 0,114) сут<sup>-1</sup>, а в осенней воде (по A-типу)  $w_1$  – 0,360 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>. Значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  для указанных экспериментов были наименьшими в зимней воде (соответственно 0,16 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0184 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)), для других сезонов пределы их колебаний составили соответственно 0,42–0,64 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0428–0,0736 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Таким образом, в воде из ПГ пониженные значения параметров I-й стадии БПК наблюдались зимой, а повышенные – весной.



**а)** 10 °С – EL:  $BPK = 0,14 (1 - e^{-0,131t}) + 0,0069t$   
 2 °С – EL:  $BPK = 0,232 (1 - e^{-0,119t}) + 0,00325t$   
**в)** 10 °С – AL:  $BPK = 0,0552 (e^{0,315t} - 1) / (1 + 0,0849e^{0,315t}) + 0,00838t$   
 2 °С – AAL:  $BPK = 0,0116 (e^{0,305t} - 1) / (1 + 0,0892e^{0,305t}) + 6,53 \cdot 10^{-4} (e^{0,100t} - 1) / (1 + 0,00201e^{0,100t}) + 0,007t$

**б)** 10 °С – EL:  $BPK = 0,78 (1 - e^{-0,0922t}) + 0,00314t$   
 2 °С – EL:  $BPK = 0,313 (1 - e^{-0,175t}) + 0,00098t$   
**г)** 10 °С – EAL:  $BPK = 0,46 (1 - e^{-0,130t}) + 2,00 \cdot 10^{-4} (e^{0,247t} - 1) / (1 + 7,87 \cdot 10^{-4} e^{0,247t}) + 0,00692t$   
 2 °С – AAL:  $BPK = 0,00394 (e^{0,347t} - 1) / (1 + 0,0101e^{0,347t}) + 1,7910^{-7} (e^{0,510t} - 1) / (1 + 5,7710^{-7} e^{0,510t}) + 0,00461t$

Рис. 5. Развитие BPK в экспериментах 2015 г. при 10 и 2 °С с водой из акватории Ивановских островов.

Обозначения типов кривых BPK и данных опытов на фрагментах б–г и рис. 6 – см. фрагмент а

Fig. 5. BOD-curves in the experiments of 2015 at 10 and 2 °С with water from Ivanovskie Islands.

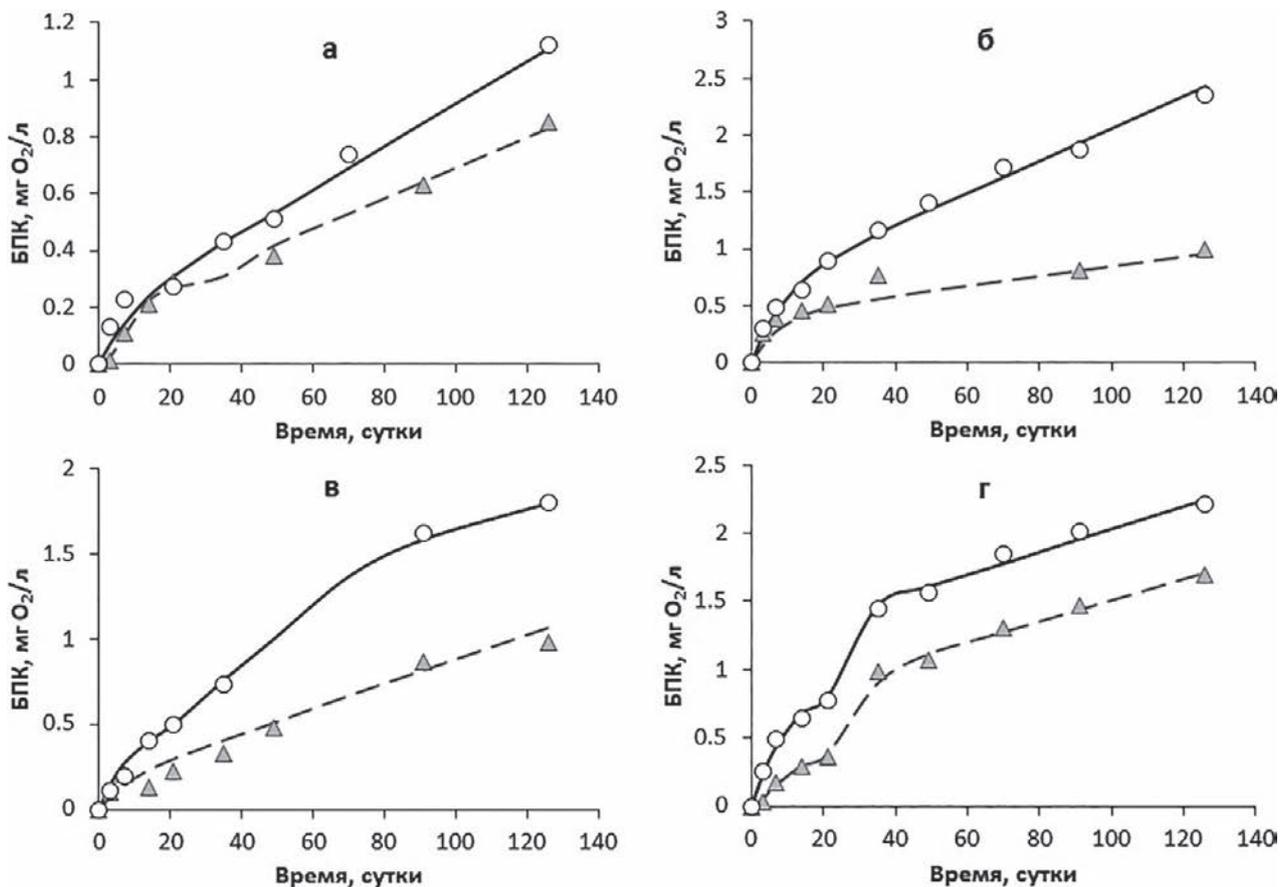
Designations of BOD calculated curves and experimental data in fragments б–г and Fig. 6 – see fragment а

Развитие II-й стадии BPK (по А-типу) в воде из ПГ при 10 °С, отмеченное в летней и осенней воде, характеризуют следующие значения параметров:  $w_2$  – 0,0771 и 0,0428 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,732 и 0,596 мг O<sub>2</sub>/л (рис. 6).

При 2 °С в экспериментах с водой из района ИО уравнение EL-типа отражало кинетику BPK в зимней и весенней воде, AAL-типа – в летней и осенней воде, а в опытах с водой из ПГ уравнения AL- и AAL-типа – в зимней и осенней воде, EL-типа – в весенней и летней воде. Зимой и весной в воде из ИО на I-й стадии (по Е-типу) получены близкие значения кинетических параметров  $k$  и  $v_1$  (в среднем 0,147 сут<sup>-1</sup> и 0,0412 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно), а летом и осенью (по А-типу) –  $w_1$  и  $v_1$  (в среднем 0,326 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и 0,0005 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответ-

ственно). Диапазон изменений предельного BPK,  $[O_2]'$ , на I-й стадии в разные сезоны варьировал в узких пределах 0,13–0,39 (в среднем 0,266) мг O<sub>2</sub>/л, а для II-й стадии в опытах с летней и осенней водой значения  $[O_2]''$  были близки и составляли соответственно 0,325 и 0,310 (в среднем 0,318) мг O<sub>2</sub>/л.

При 2 °С в воде из ПГ I-я стадия BPK (по А-типу) представлена в зимней и осенней воде близкими значениями параметров  $w_1$ ,  $[O_2]'$  и  $v_1$ , а их средние значения составили соответственно 0,322 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>, 0,18 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0015 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). В весенней и летней воде развитие I-й стадии (по Е-типу) отражали параметры:  $k$  – 0,125 и 0,129 (в среднем 0,127) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,420 и 0,158 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0525 и 0,0204 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) (табл. 2, рис. 6). Таким



- а)** 10 °C – EL:  $BPK = 0,16 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0076 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,0154 (e^{-0,309t} - 1) / (1 + 0,0962e^{-0,309t}) + 0,00724 t$
- в)** 10 °C – EAL:  $BPK = 0,42 (1 - e^{-0,111t}) + 0,0115 (e^{0,0771t} - 1) / (1 + 0,0157 e^{0,0771t}) + 0,00514 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,158 (1 - e^{-0,129t}) + 0,00724 t$

- б)** 10 °C – EL:  $BPK = 0,64 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0142 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,42 (1 - e^{-0,125t}) + 0,00429 t$

- г)** 10 °C – AAL:  $BPK = 0,198 (e^{0,360t} - 1) / (1 + 0,330e^{0,360t}) + 1,09 \cdot 10^{-6} (e^{0,481t} - 1) / (1 + 1,83 \cdot 10^{-6} e^{0,481t}) + 0,00835 t$   
 2 °C – AAL:  $BPK = 0,034 (e^{0,334t} - 1) / (1 + 0,170e^{0,334t}) + 5,53 \cdot 10^{-4} (e^{0,169t} - 1) / (1 + 1,01 \cdot 10^{-3} e^{0,169t}) + 0,0078 t$

Рис. 6. Развитие BPK в экспериментах 2015 г. при 10 и 2 °C с водой из Петрозаводской губы

Fig. 6. BOD-curves in the experiments of 2015 at 10 and 2 °C with water from Petrozavodsk Bay

образом, по результатам обработки близки только значения  $k$  для I-й стадии, а значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  соответственно в 2,7 и 2,6 раза выше в весенней воде. Значение  $[O_2]'$  для I-й стадии в летней воде сопоставимо со значениями в зимней и осенней воде, а в весенней – параметры  $[O_2]'$  и  $v_1$  I-й стадии наибольшие в этой серии экспериментов.

Значения параметров II-й стадии при 2 °C в осенней воде из ПГ не сильно отличались от полученных при 10 °C. Это служит косвенным подтверждением близкой лабильности остаточных компонентов ОВ в осенней воде, продолжающих участвовать в окислении при низких температурах. В воде, взятой из района ИО в разные сезоны, скорости BPK на линейном участке,  $\omega_s$ , меняются зимой, летом и осенью в диапазоне 0,00325–0,00829

(в среднем 0,0054) мг  $O_2$ /(л·сут), а в весенней воде значение  $\omega_s$  было наименьшим (0,00098 мг  $O_2$ /(л·сут)), в 5,4 раза ниже полученного среднего значения для других сезонов (ранее показано, что при 10 °C это отличие составляло 2,4 раза).

Оцененные в экспериментах из ПГ скорости BPK на линейной стадии при 10 и 2 °C были довольно близки и составили в среднем зимой 0,0068, весной – 0,0092, летом – 0,0062 и осенью – 0,0081 мг  $O_2$ /(л·сут), при этом значения почти всегда были выше при 10 °C (исключение – летний период). Наибольшее значение  $\omega_s$  в этой серии при 10 °C отмечено в весенней воде (0,0142 мг  $O_2$ /(л·сут)), а наименьшее – летом (0,00514).

Серия экспериментов 2015 г. при 10 и 2 °C показала, что в весенней воде значения кине-

тических параметров БПК I-й стадии в целом были выше в сравнении с показателями для других сезонов. Также долгосрочные эксперименты по БПК в осенней воде выявили практически одинаковую способность к окислению остаточных концентраций ОВ, еще сохраняющих способность к окислению при низких температурах воды.

*Серия 6: анализ данных экспериментов с водой из Петрозаводской губы (2016 г., зима, весна, осень, и 2017 г., зима, весна)*

Пробы воды для экспериментов отбирались из ПГ на станции Р2 в двух режимах: от поверхности до дна зимой и весной 2016 г. и зимой 2017 г., а также из поверхностного слоя осенью 2016 г. и весной 2017 г. (табл. 1). Эксперименты выполнялись одновременно при 20 и 10 °С (рис. 7).

В экспериментах с водой из ПГ развитие БПК при 20 °С отражено уравнениями: EAL-типа – зима 2016 г. и весна 2016 и 2017 гг., AL-типа – осень 2016 г. и EL-типа – зима 2017 г.; а при 10 °С – уравнениями EL-типа – зима 2016 и 2017 гг. и весна 2017 г.; AL-типа – весна и осень 2016 г.

Сравнение результатов экспериментов зимой 2013, 2016 и 2017 гг. показало для I-й стадии БПК при 20 °С практически одинаковые значения  $k$  (0,131–0,138, в среднем 0,136 сут<sup>-1</sup>), а также отличающиеся значения  $[O_2]'$  (0,38; 3,34 и 0,39 мг O<sub>2</sub>/л) и  $v_1$  (0,0498; 0,4600 и 0,0538 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)) с превышением значений  $[O_2]'$  и  $v_1$  ~ в 10 раз в 2016 г. При 10 °С такие отличия в значениях параметров I-й стадии БПК не фиксировались и, напротив, кинетику БПК описывали близкие по значениям параметры:  $k$  – 0,091–0,097 (в среднем 0,093) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,23–0,50 (0,35) мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0223–0,0455 (0,0324) мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

В экспериментах с весенней водой при 20 °С в 2013, 2016 и 2017 гг. выявлены для I-й стадии близкие значения параметров БПК:  $k$  – 0,0988–0,120 (в среднем 0,107) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,00–1,50 (1,17) мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0988–0,155 (0,125) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). При 10 °С кинетика I-й стадии БПК (по А- и Е-типам) характеризовалась близкими значениями  $[O_2]'$  для указанных выше лет (0,79; 0,815 и 0,85; в среднем 0,82 мг O<sub>2</sub>/л).

В осенней воде в 2016 г. развитие БПК (по А-типу) на I-й стадии при 20 и 10 °С выражалось параметрами:  $w_1$  – 0,363 и 0,339 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,691 и 1,087 мг O<sub>2</sub>/л, а  $v_1$  – 0,314 и 0,150 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

Значения скоростей БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в экспериментах 2013, 2016 и 2017 гг. при разных температурах инкубации воды оказались сопоставимыми (табл. 2). Так, средние значения  $\omega_s$  при 20 и 10 °С зимой составили 0,0289 и 0,0145, а весной – 0,0251 и 0,0115 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. В осенней воде при 20 и 10 °С значения  $\omega_s$  в 2016 г. были близки к средним весенним и составили соответственно 0,0247 и 0,0121 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а в 2013 г. они были гораздо ниже и достигали 0,0105 и 0,00857 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

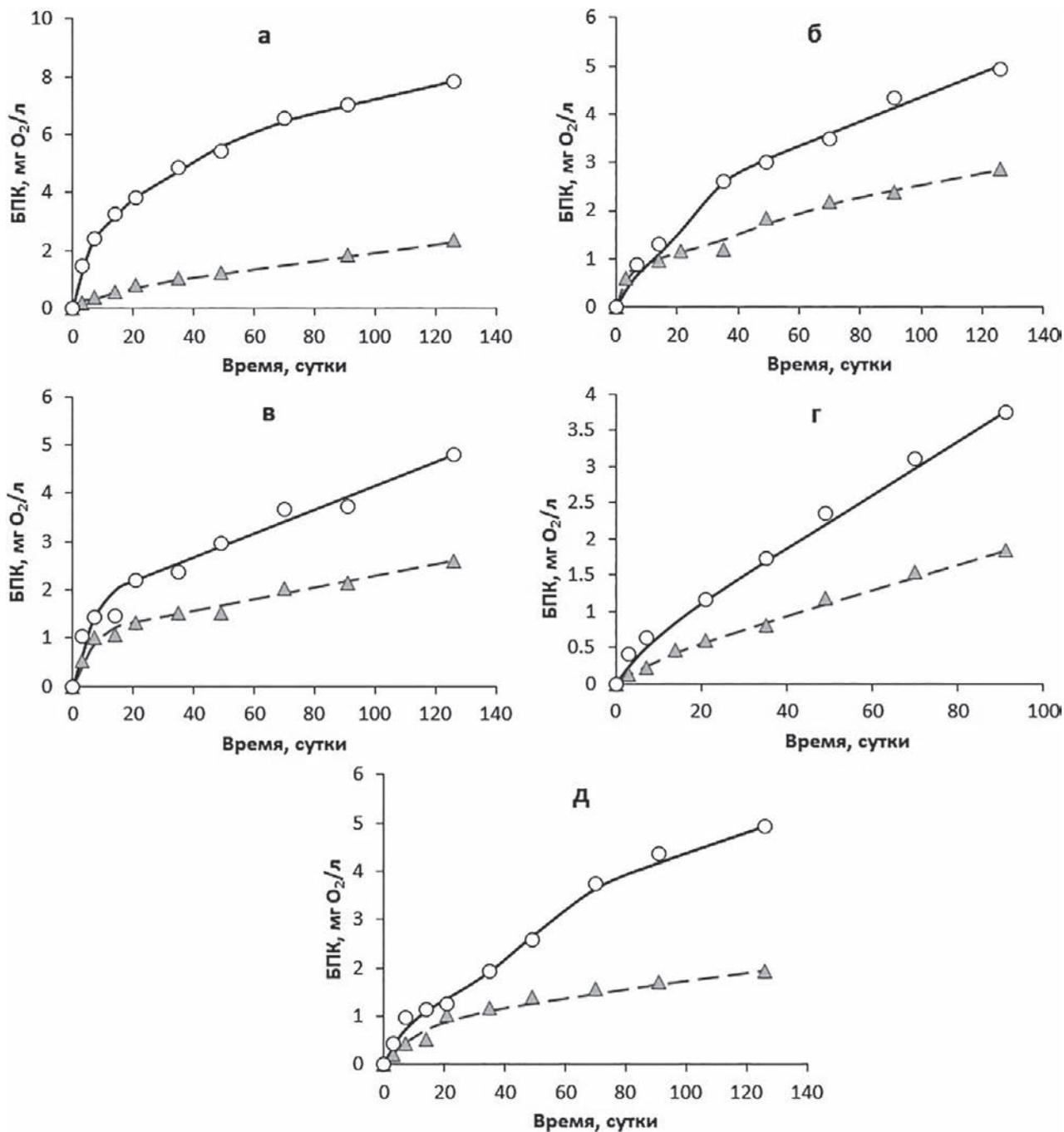
Средние значения  $\omega_s$  для разных лет и сезонов без учета экстремально низких значений в 2013 г. при 20 и 10 °С составили соответственно 0,0265 и 0,0110 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), показывая превышение значений  $\omega_s$  при 20 °С в среднем в 2,4 раза.

Следует отметить выявленные противоположные тенденции в изменении параметра  $[O_2]'$  на I-й стадии БПК в водах соседних акваторий (устьевой зоне РШ и ПГ) в зависимости от температуры инкубации воды и в разные сезоны в два смежных года (2016 и 2017 гг.). При 20 °С: в 2016 г. значение  $[O_2]'$  в воде из устья РШ в 1,4 раза выше в весенней воде, а в воде из ПГ, напротив, значение  $[O_2]'$  в 3,3 раза выше в зимней воде; в 2017 г. значение  $[O_2]'$  в воде из устья РШ было в 2,7 раза выше в зимней воде, а в воде из ПГ – в 2 раза выше в весенней воде. При 10 °С тенденции изменения  $[O_2]'$  в устье РШ и ПГ были одинаковы: весной 2016 г. значение  $[O_2]'$  было соответственно в 1,3 и 1,6 раза, а 2017 г. – в 2,0 и 3,7 раза выше, чем зимой.

#### *Сопоставление значений показателей ОВ и параметров кинетики БПК*

Содержание и состав компонентов ОВ в природных водах обычно используются для оценки состояния водной экосистемы, так как они зависят от ряда факторов, среди которых особенно важными являются трофность и гумусность вод, интенсивность продукционно-деструкционных процессов, речного стока и антропогенного влияния на водную среду. За последние годы на разных акваториях Онежского озера выполнено значительное количество измерений общего содержания ОВ. Кроме того, проведена количественная оценка компонентов автохтонного и аллохтонного ОВ, а также установлены соотношения между ними и возможности изменения их концентраций в процессе трансформации в водной среде [Ефремова, Зобкова, 2019].

Параллельно с БПК-экспериментами в 2013, 2016 и 2017 гг. при 20 °С в пробах воды анали-



- а)** 20 °С – EAL:  $BPK = 3,335 (1 - e^{-0,138t}) + 0,0417 (e^{0,0935t} - 1) / (1 + 0,0263 e^{0,0935t}) + 0,0228 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,500 (1 - e^{-0,091t}) + 0,0142 t$
- б)** 20 °С – EAL:  $BPK = 1,00 (1 - e^{-0,0988t}) + 0,00144 (e^{0,236t} - 1) / (1 + 0,0017 e^{0,236t}) + 0,0254 t$   
 10 °С – EAL:  $BPK = 0,85 (1 - e^{-0,247t}) + 0,0077 (e^{0,0911t} - 1) / (1 + 0,016 e^{0,0911t}) + 0,0121 t$
- в)** 20 °С – AL:  $BPK = 0,511 (e^{0,363t} - 1) / (1 + 0,302 e^{0,363t}) + 0,0247 t$   
 10 °С – AL:  $BPK = 0,408 (e^{0,339t} - 1) / (1 + 0,375 e^{0,339t}) + 0,0121 t$
- г)** 20 °С – EL:  $BPK = 0,39 (1 - e^{-0,138t}) + 0,037 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,23 (1 - e^{-0,0968t}) + 0,0177 t$
- д)** 20 °С – EAL:  $BPK = 1,00 (1 - e^{-0,120t}) + 0,0033 (e^{0,120t} - 1) / (1 + 0,00266 e^{0,120t}) + 0,0214 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,85 (1 - e^{-0,0876t}) + 0,00867 t$

Рис. 7. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10 °С с водой из Петрозаводской губы в 2016 г.: а – зима, б – весна, в – осень и в 2017 г.: г – зима, д – весна

Fig. 7. BOD-curves in the experiments at 20 and 10 °С with water from Petrozavodsk Bay in 2016: а – winter, б – spring, в – autumn; and in 2017: г – winter, д – spring

тически определяли показатели содержания ОВ ( $C_{орг}$ , ПО, ХПК) и по эмпирическим уравнениям вычисляли значения отдельных компонентов ОВ:  $C_{лаб}$ ,  $C_{стаб}$ ,  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  (табл. 3).

Все измеренные в разные сезоны показатели ОВ оказались повышенными в водах из устья РШ: зимой, весной, летом и осенью средние значения  $C_{орг}$  составили 17,9; 14,7; 15,0 и 12,9 мг С/л, а ПО – 22,6; 20,3; 15,1 и 14,1 мг О/л соответственно. В отдельных акваториях Онежского озера концентрации  $C_{орг}$  в эти же сезоны были ниже, чем в речных водах, и в среднем составили 10,2; 9,9; 7,1 и 8,2 мг С/л, а ПО – 11,7; 9,9; 7,4 и 11,1 мг О/л соответственно. В целом наибольшие значения измеренных параметров ОВ зафиксированы в зимней воде, а наименьшие – в летней. Разность значений  $ХПК_0 - ХПК_{126}$ , которая характеризует потенциал окисления условно «стойкой» фракции ОВ, составила в среднем в зимней, весенней, летней и осенней воде из устья РШ соответственно 11,5; 14,7; 18,4 и 10,9 мг О/л, а по акваториям Онежского озера – 6,7; 12,2; 3,0 и 6,4 мг О/л. Среднее значение  $ХПК_0 - ХПК_{126}$  было максимальным в воде из устья РШ летом, а в разных акваториях Онежского озера – весной.

В воде из разных районов Онежского озера расчетные значения содержания С в лабильной и условно «стойкой» фракциях ОВ в среднем составили соответственно зимой – 0,34 и 9,81, весной – 0,38 и 9,53, летом – 0,15 и 6,92 и осенью – 0,28 и 7,92 мг С/л. В воде из устья РШ средние значения этих компонентов ОВ были намного выше, чем в озере: зимой – 0,61 и 17,26, весной – 0,68 и 14,06, летом – 2,39 и 12,61 и осенью – 0,26 и 12,54 мг С/л. Таким образом, повышено содержание С в лабильной фракции ОВ в акваториях Онежского озера весной (0,38 мг С/л), а в воде из устьевой зоны РШ – летом (2,39 мг С/л). В условно «стойкой» фракции повышение концентраций С для речных и озерных вод отмечалось зимой и составляло 9,81 и 17,26 мг С/л соответственно. В то же время пониженное содержание С в лабильной и условно «стойкой» фракциях зафиксировано в летней воде из Онежского озера (соответственно 0,15 и 6,92 мг С/л), а в воде из устья РШ – осенью (0,36 и 12,54 мг С/л).

Средние расчетные концентрации  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  в воде из разных акваторий Онежского озера составляли зимой – 4,72 и 4,56, весной – 4,61 и 4,43, летом – 3,28 и 3,22 и осенью – 3,82 и 3,68 мг/л. В воде из устья РШ значения этих показателей зимой – 8,25 и 8,03, весной – 6,85 и 6,54, летом – 6,98 и 5,86 и осенью – 6,00 и 5,83 мг/л. Таким образом, в водах акваторий

Онежского озера и устья РШ зимой расчетные суммарные концентрации  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  повышены, а летом и осенью понижены.

Надо отметить, что по всем показателям содержания ОВ, в том числе лабильных и условно «стойких» компонентов, наблюдались более высокие значения для воды из устья РШ, чем для озерных вод (табл. 3). Это, по-видимому, связано с тем, что река является мезополигумусным эвтрофным водным объектом.

Для проверки соответствия компонентов ОВ кинетическим параметрам БПК использованы приведенные в работе [Ефремова, Зобкова, 2019] данные по содержанию лабильных компонентов (углеводов, липидов и белков), а также ГВ (сравнительно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ) в воде, использованной также и в БПК-опытах. Данные были получены в пробах воды из поверхностного горизонта (1 м) в ЦП Онежского озера и ПГ (осень 2016 г., зима и весна 2017 г.), а также из устьевой зоны РШ (зима, весна 2017 г.).

На рис. 8 показаны полученные зависимости между значениями лабильных компонентов ОВ (углеводов, липидов и белков) и потреблением  $O_2$  на I-й и II-й стадиях (а), между показателями ОВ, характеризующими окисление условно «стойких» ГВ и косвенных показателей ОВ ( $ХПК_0$ ) с общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s \cdot 126$  (б, в), а также между скоростными параметрами изменений значений стойких компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ) и потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s$ ). По каждой группе взаимодействующих показателей ОВ с кинетическими параметрами БПК получено по три зависимости, характеризующие высокосignификантными значениями коэффициентов детерминации  $R^2$  (рис. 8). Зависимости I и III на рис. 8 (а) формируют показатели ОВ и параметры I-й стадии БПК для разных сезонов и акваторий: в верхней части на этих зависимостях повышены значения показателей для устья РШ (зима 2017 г.), в центральной – средние значения показателей ПГ (осень 2016 г.), а в нижней – пониженные значения для ЦП (зима, весна 2017 г.). Для зависимости II верхнюю часть определяют высокие показатели ОВ и потребления  $O_2$  на II-й стадии, характеризующие акватории устья РШ (зима 2017 г.) и ПГ (весна 2017 г.), а в ее нижней части сосредоточены наименьшие значения показателей акватории ЦП (осень 2016 г.).

На рис. 8 (б) четко прослеживаются три зоны с характерными значениями ГВ: повышенными для устья РШ (33 мг О/л), средними для ПГ (16,8–18,3 мг О/л) и низкими для ЦП (7,2–12,0 мг О/л). Зависимость I при 20 °С вы-

Таблица 3. Сводная таблица показателей ОБ в воде из разных акваторий Онежского озера в 2013, 2016 и 2017 гг.

Table 3. Summary table of organic matter concentrations in water from different areas of Lake Onego in 2013, 2016 and 2017

Сезон Season	Район озера, год (тип отбора пробы) Lake area, year (sampling type)	Аналитические измерения Analytical measurements					По эмпирическим связям Calculated characteristics			
		C <sub>орг'</sub> мг С/л ТОС, mg/l	ПО, мг О/л COD <sub>Mn'</sub> mg O/l	ХПК <sub>0</sub> COD <sub>Cr0</sub>	ХПК <sub>49</sub> COD <sub>Cr49</sub>	ХПК <sub>126</sub> COD <sub>Cr126</sub>	C <sub>лаб</sub> C <sub>lab</sub>	C <sub>стаб</sub> C <sub>stab</sub>	ОБ <sub>Σ</sub> OM <sub>Σ</sub>	ОБ <sub>стаб</sub> OM <sub>stab</sub>
				мг О/л mg O/l			мг С/л mg C/l		мг/л mg/l	
Зима Winter	РШ / RS, 2013 (1)	17,0	23,7	45,9	37,4*	33,7	0,41	16,60	7,91	7,72
	ПГ / PB, 2013 (2)	8,6	9,5	21,3	18,8*	18,4	0,11	8,49	4,00	3,95
	КГ / KB, 2013 (2)	7,9	8,5	20,6	-	17,6	0,13	7,77	3,67	3,61
	ПГ / PB, 2016 (2)	12,7	15,4	37,8	-	-	1,00	11,70	5,91	5,44
	РШ / RS, 2016 (1)	18,0	21,5	51,3	-	-	0,60	17,40	8,37	8,09
	ПГ / PB, 2017 (2)	11,4	13,2	29,5	28,0	25,7	0,12	11,28	5,30	5,25
	РШ / RS, 2017 (1)	18,6	22,6	49,0	45,6*	40,6	0,83	17,78	8,65	8,27
Весна Spring	РШ / RS, 2013 (1)	11,8	19,7	33,4	28,5	25,5	0,90	10,90	5,49	5,07
	ПГ / PB, 2013 (2)	10,0	12,7	24,4	22,4	16,5	0,45	9,55	4,65	4,44
	КГ / KB, 2013 (1)	7,8	11,3	24,0	19,3	14,8	0,59	7,22	3,63	3,36
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	8,3	8,9	19,8	18,6	11,1	0,24	8,06	3,86	3,75
	ПГ / PB, 2016 (2)	10,7	12,2	29,6	-	-	0,30	10,40	4,98	4,84
	РШ / RS, 2016 (1)	16,2	19,7	42,4	-	-	0,83	15,38	7,54	7,15
	ПГ / PB, 2017 (1)	12,7	16,5	33,8	-	-	0,30	12,40	5,91	5,77
РШ / RS, 2017 (1)	16,2	21,6	44,9	-	-	0,30	15,90	7,53	7,40	
Лето Summer	РШ / RS, 2013 (1)	15,0	15,1	38,5	25,9	20,1	2,39	12,61	6,98	5,86
	ПГ / PB, 2013 (2)	7,3	7,6	15,4	13,7	13,4	0,07	7,23	3,39	3,37
	КГ / KB, 2013 (2)	6,2	8,2	18,3	16,8	12,9	0,19	6,01	2,63	2,80
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	7,7	6,4	20,1	20,8	18,5	0,18	7,52	3,58	3,50
Осень Autumn	РШ / RS, 2013 (1)	12,9	14,1	30,8	20,3	19,9	0,36	12,54	6,00	5,83
	ПГ / PB, 2013 (2)	7,2	7,8	17,8	18,7	16,0	0,35	6,86	3,35	3,19
	КГ / KB, 2013 (2)	8,0	8,0	17,4	14,3	14,0	0,17	7,83	3,72	3,64
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	6,7	7,8	16,2	13,0	10,3	0,10	6,61	3,12	3,07
	ПГ / PB, 2016 (1)	10,9	13,6	27,8	-	-	0,51	10,39	5,07	4,83

Примечание. РШ – река Шуя; \* соответствует времени t = 70 сут.; прочерк – отсутствие данных.

Note. COD<sub>Cr0</sub>, COD<sub>Cr49</sub>, COD<sub>Cr126</sub> – chemical oxygen demand at 0, 49 and 126 days; COD<sub>Mn</sub> – permanganate oxidizability; TOC – total organic carbon; C<sub>lab</sub> – labile carbonate; C<sub>stab</sub> – stable carbonate; OM<sub>Σ</sub> – organic matter amount; OM<sub>stab</sub> – stable organic matter; RS – River Shuya; \* correspond with time = 70 days. The dash is the absence of data.

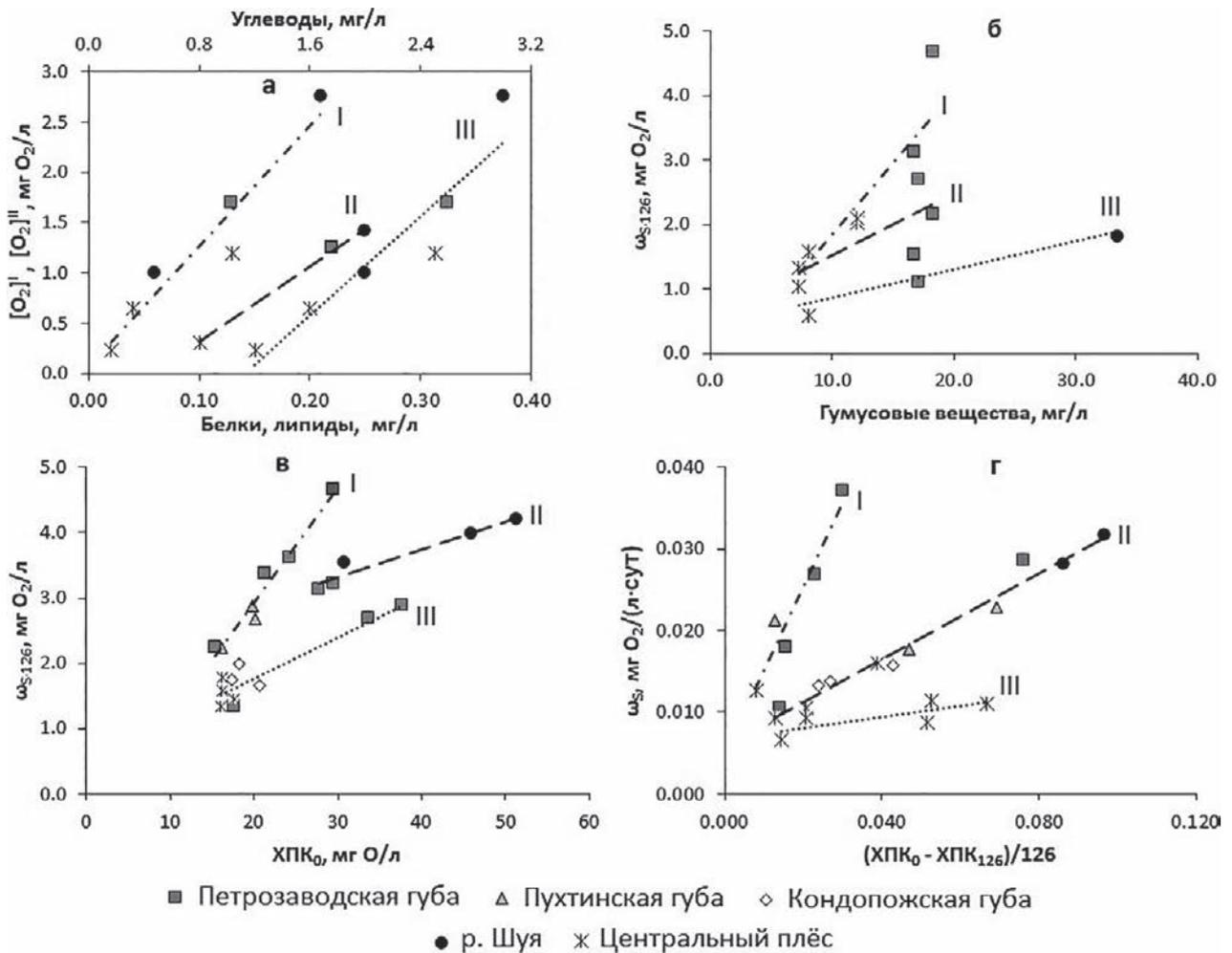


Рис. 8. Соответствие значений показателей ОВ и кинетических параметров БПК.

**а** – зависимости I–III между начальными концентрациями лабильных компонентов ОВ (Б – белки, Л – липиды и У – углеводы) и потреблением  $O_2$  на I-й и II-й стадиях:

- I.  $[O_2]^I$  мг  $O_2$ /л =  $11,941 \cdot [Б] + 0,0834$  ( $R^2 = 0,93$ )
- II.  $[O_2]^{II}$  мг  $O_2$ /л =  $7,4952 \cdot [Л] - 0,4344$  ( $R^2 = 1,00$ )
- III.  $[O_2]^I$  мг  $O_2$ /л =  $1,2249 \cdot [У] - 1,3753$  ( $R^2 = 0,87$ )

**б** – зависимости I–III между содержанием ГВ и общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$ ) при разных температурах:

- I. При 20 °C:  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,2201 \cdot [ГВ] - 0,3454$  ( $R^2 = 0,77$ )
- II. При 10 °C (б):  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0942 \cdot [ГВ] + 0,5859$  ( $R^2 = 0,71$ )
- III. При 10 °C (а):  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0442 \cdot [ГВ] + 0,4201$  ( $R^2 = 0,79$ )

**в** – зависимости I–III между исходными значениями  $XPK_0$  и общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s \cdot 126$ :

- I.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,1758 \cdot [XPK_0] - 0,5899$  ( $R^2 = 0,97$ )
- II.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,043 \cdot [XPK_0] + 2,0191$  ( $R^2 = 0,93$ )
- III.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0625 \cdot [XPK_0] + 0,5212$  ( $R^2 = 0,85$ )

**г** – зависимости I–III между скоростями изменения условно «стойких» компонентов ОВ ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) и потребления  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s$ :

- I.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $1,0211 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0048$  ( $R^2 = 0,93$ )
- II.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $0,2611 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0060$  ( $R^2 = 0,98$ )
- III.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $0,0658 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0068$  ( $R^2 = 0,60$ )

Fig. 8. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters: **а** – linear connections I–III between initial labile OM concentrations (Б – proteins, Л – lipids and У – carbohydrates) and  $O_2$  demand at first and second stages; **б** – linear connections I–III between humic substances (ГВ) concentrations and common  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s \cdot 126$ ) at different temperatures; **в** – linear connections I–III between initial  $XPK_0$  values and common  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s \cdot 126$ ); **г** – linear connections I–III between the rate of change conditionally «stable» OM components ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) and  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s$ )

деляется наиболее резким изменением значений показателей ГВ (в пределах 10–20 мг О<sub>2</sub>/л) и общего потребления О<sub>2</sub> на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$  от 1 до 4,7 мг О<sub>2</sub>/л). При 10 °С фиксируются разные изменения показателей: для зависимости II они менее значимы ( $\omega_s \cdot 126$  в пределах от 1 до 2 мг О<sub>2</sub>/л), а для зависимости III характерны большие изменения концентраций ГВ (до 33 мг О/л) при меньшей изменчивости  $\omega_s \cdot 126$  (от 1 до 1,5 мг О<sub>2</sub>/л).

На рис. 8 (в) четко выявляются три зоны характерных исходных значений ХПК<sub>0</sub>. В зоне 1 в нижней части зависимостей I и III (КГ – лето, осень 2013 г.; ЦП – лето, осень, 2013, 2014 гг.) отмечены наименьшие значения ХПК<sub>0</sub> (16–22 мг О/л) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в пределах 1–3 мг О<sub>2</sub>/л. В зоне 2 значения ХПК<sub>0</sub> составляли 20–40 мг О/л и включали среднюю часть зависимости I (ПГ – зима, весна, 2013 г.), нижнюю часть зависимости II (ПГ – весна, осень 2016 г.; устье РШ – осень 2013 г.) и верхнюю часть зависимости III (ПГ – зима 2016 г., весна 2017 г.) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в диапазоне 2,5–3,5 мг О<sub>2</sub>/л. В зоне 3 значение данного параметра достигало 30–50 мг О/л и включало верхние участки зависимостей I (ПГ – зима 2017 г.) и II (устье РШ – зима 2013, 2016 гг.) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в пределах 4,0–4,7 мг О<sub>2</sub>/л.

На рис. 8 (г) зависимость I построена преимущественно по данным для ПГ (зима 2017 г., зима, весна, лето 2013 г.) и включает диапазоны изменений параметров  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  (от 0,01 до 0,03) и  $\omega_s$  (от 0,010 до 0,037). Зависимость II включает результаты анализа вод из горизонта 1,0 м для устья РШ (зима, осень 2013 г.), ПГ, ПХ (весна, осень 2013 г.), КГ (зима, весна, лето 2013 г.), ЦП (весна 2013 г., лето 2014 г., зима 2017 г.), при этом значения  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  изменяются в пределах от 0,02 до 0,10, а  $\omega_s$  – от 0,010 до 0,030 мг О<sub>2</sub>/(л·сут). Зависимость III построена по данным анализа воды из ЦП (лето, осень 2013 г., весна, осень 2014 г.) и включает значения  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  от 0,02 до 0,07 и  $\omega_s < 0,010$  мг О<sub>2</sub>/(л·сут). Важным обстоятельством, которое следует отметить по зависимостям на рис. 8 (г), является повышение скорости потребления О<sub>2</sub> на линейной стадии с ростом скорости изменения условно «стойких» компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ). Хотя скорость трансформации ГВ, которые относятся к этим компонентам, крайне мала и слабо изменяется в различные сезоны года [Лозовик и др., 2017]. Возможно, это связано с влиянием взвешенного ОВ, которое увеличивается в водоемах с выраженным трофическим статусом

и играет важную роль во время трансформации ОВ [Ostapenia et al., 2009; Верес, Остапеня, 2011].

Общий анализ данных на рис. 8 позволяет выделить следующие закономерности: в зону 1 на рис. 8 (б–г) попадают в основном низкопродуктивные акватории Онежского озера (ЦП и КГ), а иногда ПХ (мелководная губа с хорошим водообменом) и ПГ в летне-осенний период, когда гидрохимические характеристики вод в ПГ и ЦП близки. В промежуточной зоне 2 расположены в основном участки ПГ и ПХ, которые более продуктивны в сравнении с открытыми районами Онежского озера. В третью зону попадают наиболее продуктивные устьевые участки РШ и ПГ в весенний и зимний периоды, когда вода в губе по гидрохимическим показателям близка к воде из устья РШ.

## Заключение

Данные длительных экспериментов получены при исследовании кинетики БПК в пробах воды из разных акваторий Онежского озера: в воде из ПХ, КГ, ПГ и устьевой зоны РШ в 2013, 2016 и 2017 гг. при 20 и 10 °С, а в воде из ПГ и района ИО – в 2015 г. при 10 и 2 °С. Всего проведено 48 экспериментов при разных температурах в различные сезоны года. Полученные в ходе экспериментов параметры довольно точно описывают изменения во времени значений БПК.

При анализе БПК-данных установлено, что значения кинетических параметров, как правило, были выше в экспериментах при более высоких температурах, чем при более низких. Однако в ряде экспериментов обнаружено одинаково активное развитие БПК при разных температурах в период первых 20 сут, и при этом значения параметров БПК в уравнениях оказывались достаточно близкими. Из всех серий экспериментов, выполненных для разных акваторий Онежского озера, получены среднесезонные значения кинетических параметров БПК. Надо отметить, что в этом анализе не использованы данные для устья РШ, которые отличались повышенными значениями параметров БПК (при этом не учитывались повышенные значения параметров, полученные в экспериментах с водой из устья РШ).

В зимних экспериментах при 20 и 10 °С развитие I-й стадии БПК воспроизводилось уравнением E-типа, и только в воде из ПГ при 2 °С в 2015 г. развитие БПК следовало уравнению A-типа. В то же время выявлено, что кинетика БПК (по E-типу) на I-й стадии практически не отличалась при 10 и 2 °С.

Так, значения  $k$  составили 0,117 и 0,119 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,283 и 0,232 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,0274 и 0,0277 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно.

Оцененные по уравнению Е-типа при 20, 10 и 2 °С средние скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , составили соответственно 0,0250; 0,0130 и 0,00325 мг  $O_2$ /(л·сут). Соотношение скоростей БПК на I-й и линейной стадиях при 20 и 10 °С отличалось незначительно (в 2,2–2,1 раза), а при 2 °С достигало 8,5 раза. Эти результаты показывают, что в зимней воде режим окисления компонентов ОВ меняется при разных температурах хранения испытываемой пробы. На линейной стадии за период опыта (126 сут) суммарное значение БПК при 20, 10 и 2 °С составляло соответственно 3,15; 1,52 и 0,41 мг  $O_2$ /л. Таким образом, в сравнении с окислением условно «стойких» компонентов ОВ при 10 °С потребление  $O_2$  при 20 °С было в 2,1 раза выше, а при 2 °С – в 3,7 раза ниже.

Кинетика БПК в весенних экспериментах отражена уравнениями EL-, EA-, EAL-типов. Описание I-й стадии БПК (по Е-типу) при 20 и 10 °С характеризовалось близкими средними значениями параметров  $k$  – 0,113 и 0,126 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,25 и 1,08 мг  $O_2$ /л и  $v_1$  – 0,144 и 0,112 мг  $O_2$ /(л·сут), при 2 °С они отличались ( $k$  – 0,150 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,366 мг  $O_2$ /л и  $v_1$  – 0,0537 мг  $O_2$ /(л·сут)). Кроме этого, выявлена разная тенденция снижения значений параметров БПК при уменьшении температуры: от 20 до 10 °С скорость потребления  $O_2$  на I-й стадии снижалась в 1,3 раза, что свидетельствует о небольших отличиях в лабильности окисляющихся фракций ОВ, а от 10 до 2 °С – в 2,1 раза. Предполагается, что потенциал окисления лабильных компонентов ОВ при снижении температуры от 10 до 2 °С существенно ниже с общим сокращением спектра окисляемых компонентов ОВ.

Потребление  $O_2$  на II-й стадии БПК при 20 и 10 °С составило 0,778 и 0,525 мг  $O_2$ /л, что соответственно в 1,6 и 2 раза ниже потребления  $O_2$  на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ. В весенней воде средняя скорость потребления  $O_2$  на линейной стадии,  $\omega_s$ , при 20, 10 и 2 °С составляла соответственно 0,0270; 0,00884 и 0,00264 мг  $O_2$ /(л·сут). Таким образом, в сравнении с I-й стадией окисления лабильного ОВ на линейной стадии отмечено более интенсивное снижение скорости потребления  $O_2$  на окисление условно «стойких» фракций ОВ при уменьшении температуры воды от 20 до 10 и далее до 2 °С соответственно в 3,1 и 3,4 раза.

В экспериментах с летними пробами воды кинетика БПК следовала уравне-

ниям AL-, EAL-, EL- и AAL-типов. В результате анализа данных установлено, что при 20 и 10 °С есть отличия в значениях параметров БПК, описывающих кинетику процесса уравнениями А-типа в разные годы. Так, при 20 °С в воде из ПХ значения  $[O_2]'$  достигали 1,41 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,214 мг  $O_2$ /(л·сут); при 10 °С в воде из района ИО средние значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  были ниже и составляли 0,717 мг  $O_2$ /л и 0,0967 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно.

В опытах с водой из КГ и ПГ (по Е-типу) при 20, 10 и 2 °С значения  $k$  составляли 0,138; 0,112 и 0,129 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,425; 0,333 и 0,158 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,0661; 0,0385 и 0,0204 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно. Как видно, при уменьшении температуры хранения исследуемой воды от 20 до 10 и далее до 2 °С наблюдается естественное снижение значений параметров  $[O_2]'$  и  $v_1$ . На II-й стадии потребление  $O_2$  при 20 и 10 °С составило соответственно 0,452 и 0,528 мг  $O_2$ /л, сопоставимые с потреблением  $O_2$  на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ.

Анализ значений скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , дает основание для предположения о наличии взаимосвязи между скоростями потребления  $O_2$  на I-й и последующей линейной стадии. При развитии I-й стадии по уравнению А-типа скорости БПК на линейной стадии оказались выше, хотя при этом скорости потребления  $O_2$  были ниже, чем при развитии по Е-типу. Такая особенность выявлена при 20 и 10 °С, а при 2 °С скорости БПК на линейной стадии практически не отличались от оцененных при 10 °С. Важное значение имеют и соотношения скоростей потребления  $O_2$  между I-й и линейной стадиями. Так, соотношение скоростей при 20, 10 и 2 °С по Е-типу составляло соответственно 3,9; 4,6 и 2,8, а по А-типу было близким и равнялось 1,0 (при 20 и 10 °С) или < 1,0 (при 2 °С).

Для описания кинетики БПК в осенних опытах использовались уравнения AL-, AAL-, EAL- и EA-типов. В большинстве экспериментов I-я стадия БПК описывалась уравнениями А-типа, а средние значения параметров при 20, 10 и 2 °С составили соответственно  $w_1$  – 0,294; 0,325 и 0,340 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,151; 0,684 и 0,295 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,1380; 0,0566 и 0,0014 мг  $O_2$ /(л·сут). При 20 и 10 °С (по Е-типу) средние параметры  $k$  достигали 0,150 и 0,111 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,57 и 0,38 мг  $O_2$ /л,  $v_1$  – 0,0885 и 0,0437 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно. Потребление  $O_2$  при 20 и 10 °С на II-й стадии по А-типу составило 0,525 и 0,636 мг  $O_2$ /л, а по Е-типу – 0,330 и 0,465 мг  $O_2$ /л соответственно. Необходимо отметить, что в осенней воде расход  $O_2$  на окисление компонентов ОВ на II-й стадии был сопоставим с потреблением на I-й стадии.

Отличительной особенностью кинетики БПК в осенней воде является более высокая скорость БПК на I-й стадии при описании уравнениями А-типа. Очевидно, что ассортимент компонентов ОВ, участвующих в окислении на I-й стадии, не постоянен в течение года и осенью он сменяется менее лабильными компонентами ОВ, на окисление которых расходуется больший запас растворенного  $O_2$  в сравнении с другими сезонами.

Средние скорости БПК,  $\omega_s$ , на линейной стадии (по А-типу) при 20, 10 и 2 °С составляли соответственно 0,0176; 0,00883 и 0,00621 мг  $O_2$ /(л·сут). При этом значения при 20 и 10 °С были ниже соответственно в 7,8 и 6,4 раза, а при 2 °С – выше в 4,4 раза, чем на I-й стадии. Обратная картина наблюдалась в уравнениях по Е-типу: скорости БПК на I-й стадии при 20 и 10 °С были выше в 6,2 и 6,3 раза, чем на линейной стадии.

В результате анализа данных показано соответствие концентраций лабильных и условно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ кинетическим параметрам БПК для различных акваторий Онежского озера. Так, при 20 °С выявлены зависимости между значениями предельного потребления  $O_2$  и концентрациями белков и углеводов ( $R^2 = 0,87-0,93$ ) на I-й и липидами ( $R^2 = 1,00$ ) на II-й стадиях БПК. Получены зависимости между концентрациями ГВ и суммарным потреблением  $O_2$  на линейной стадии при 20 °С ( $R^2 = 0,77$ ) и 10 °С ( $R^2 = 0,71-0,79$ ). Установлено по три вида линейной зависимости между значениями  $XPK_0$  и общим потреблением  $O_2$  ( $\omega_s \cdot 126$ , мг  $O_2$ /л) на линейной стадии БПК за 126 сут ( $R^2 = 0,85-0,97$ ), которые характеризуют потенциалы окислительных процессов в воде. По три зависимости обнаружено между параметрами, связывающими изменения значений ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) и  $\omega_s$ , которые характеризуют условия окисления в разные сезоны условно «стойких» фракций ОВ ( $R^2 = 0,60-0,99$ ).

Подводя итог, необходимо отметить, что на примере выполненных долгосрочных измерений БПК совместно с определениями показателей содержания в исследуемых водах различных фракций ОВ получены весомые доказательства перспективности использования теста БПК для объяснения особенностей мультистадийных окислительных процессов в воде из разных акваторий Онежского озера (относительно чистых вод ЦП и акваторий, подверженных антропогенному воздействию, – ПГ, КГ, ПХ). Присутствие в природных водах разных по составу и количеству компонентов ОВ отражается на фиксируемых в долгосрочных экспе-

риментах типах БПК-кривых. С помощью формально-кинетического анализа для каждого БПК-эксперимента оценены кинетические параметры по отдельным стадиям процесса. Получено подтверждение, что воды ЦП сохраняют высокое качество, по сравнению с другими акваториями, при этом отличия наиболее значимы в весенний период, когда в воде наиболее активны продукционные процессы.

В дальнейшем планируется представить информацию о специфике развития окислительных процессов и установить взаимосвязи кинетических показателей БПК с концентрациями разных фракций ОВ для разнотипных водоемов Карелии, включая малые озера различной трофности и разные акватории Ладожского озера. Кроме того, одной из важнейших задач для дальнейших исследований представляется установление влияния взвешенного ОВ на процессы БПК, расходуемого на окисление разных компонентов ОВ в водоемах с различным трофическим статусом.

*Финансовое обеспечение исследований в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН (Петрозаводск) осуществлялось из средств федерального бюджета в рамках государственного задания КарНЦ РАН, а в ИО РАН им. П. П. Ширшова (Москва) – в рамках темы № 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

- Бояринов П. М., Петров М. И. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
- Верес Ю. К., Остапеня А. П. Содержание лабильного органического вещества в воде озер Нарочанского региона // Вестник БГУ. Сер. 2. 2011. № 2. С. 45–49.
- Ефремова Т. А., Зобкова М. В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. С. 60–75. doi: 10.17076/lim1017
- 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.

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

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

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., 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., Зобкова М. В. Значения кинетических параметров БПК длительных экспериментов (на примере анализа данных с разными интегральными пробами воды из Онежского озера) // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 40–61. doi: 10.17076/lim1164

Лозовик П. А., Зобкова М. В., Рыжаков А. В., Зобков М. Б., Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Ефремова Т. В. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы // ДАН. 2017. Т. 477, № 6. С. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, №. 1. С. 88–98. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

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

Лозовик П. А., Куликова Т. П., Мартынова Н. Н. Мониторинг водных объектов Карелии в 1992–2000 гг.

// Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 135–144.

Сабылина А. В. Химический состав губ Онежского озера, подверженных антропогенному загрязнению // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 77–88.

Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды КарНЦ РАН. 2016. №. 9. С. 68–77. doi: 10.17076/lim307

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.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, №. 6. С. 717–729.

Швец Л. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследования режима и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии. Л.: Наука, 1977. Вып. 2. С. 3–24.

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

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia // J. Great Lakes Res. 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

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

Поступила в редакцию 13.07.2020

## References

Boyarinov P. M., Petrov M. P. Protsessy formirovaniya termicheskogo rezhima glubokikh presnovodnykh vodoemov [Formation processes of thermal regime in deep freshwater bodies]. Leningrad: Nauka, 1991. 175 p.

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

Efremova T. A., Zobkova M. V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera [Concentration, distribution and ratio of the main organic matter components in Lake Onego water]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 9. P. 60–75. doi: 10.17076/lim1017

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения [Lake Onego ecosystem and its change trends]. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p.

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Izmeneniya gidrokhimicheskogo rezhima Onezhskogo ozera s nachala 1990-kh godov [Changes in the hydrochemical regime of Lake Onego since the early 1990s]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Proceed. PAS. Geographical Ser.]. 2019. No. 1. P. 62–72. doi: 10.31857/S2587-55662019162-72

Leonov A. V. Obobshchenie, tipizatsiya i kineticheskii analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov [The generalization, typification, and kinetic analysis of the curves of oxygen consumption according

to the BOD-experiments]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1974. Vol. 14, iss. 1. P. 82–87.

Leonov A. V., Lozovik P. A., Ikko O. I. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh po biokhimicheskoyu 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., 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

Leonov A. V., Zobkova M. V. Znacheniya kineticheskikh parametrov BPK dlitel'nykh eksperimentov (na primere analiza dannykh s raznymi integral'nymi probami vody iz Onezhskogo ozera) [BOD kinetic parameter values from long-term experiments (with different integrated water samples from the central part of Lake Onego)]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 4. P. 40–61. doi: 10.17076/lim1164

Lozovik P. A., Kulikova T. P., Martynova N. N. Monitoring vodnykh ob'ektov Karelii v 1992–2000 gg. [Monitoring of Karelian water objects in 1992–2000]. *Gidroekol. probl. Karelii i ispol'zovanie vodnykh resursov* [Hydroecol. probl. of Karelia and use of water res.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 135–144.

Lozovik P. A., Zobkova M. V., Ryzhakov A. V., Zobkov M. B., Efremova T. A., Sabylina A. V., Efremova T. V. Allokhtonnoe i avtokhtonnoe organicheskoe veshchestvo prirodnykh vod: kineticheskie i termodinamicheskie zakonomernosti transformatsii, kolichestvenny i kachestvenny sostavy [Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic laws of transformation, quantitative and qualitative composition]. *DAN* [Dokl. Russ. Acad. Sci.]. 2017. Vol. 477, no. 6. P. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Otsenka vneshnego vodoobmena zalivov ozer po khimicheskim pokazatelyam vody [Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2019. Vol. 46, no. 1. P. 88–98. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

RD 52.24.421-2012. Khimicheskoe potreblenie kisloroda v vodakh. Metodika izmerenii titrimetricheskim metodom [Chemical oxygen demand in waters. Measuring by the titrimetric method]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2012. 19 p.

Sabylina A. V. Khimicheskii sostav gub Onezhskogo ozera, podverzhennykh antropogennomu zagryazneniyu [The chemical composition of the Lake Onega bays exposed to man-induced impact]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi terr. Rossii: sovr. sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimati-*

*cheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-west European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 61–67.

Sabylina A. V. Postuplenie v Onezhskoe ozero organicheskogo ugleroda, obshchego fosfora i obshchego azota s rechnym stokom i vynos s vodami r. Sviri v 1965–2008 godakh [An inflow of organic carbon, total phosphorus and total nitrogen to Lake Onego with stream runoff, and their removal by the Svir river water in 1965–2008]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 68–77. doi: 10.17076/lim307

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 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., Ryzhakov A. V. Gidrokhimicheskaya kharakteristika litoral'noi zony Onezhskogo ozera [Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onega]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2018. Vol. 45, no. 2. P. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

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

Veres J. K., Ostapenia A. P. Soderzhanie labil'nogo organicheskogo veshchestva v vode ozer Narochanskogo regiona [Labile organic matter concentrations in water of the Naroch Lakes]. *Vestnik BGU. Ser. 2* [J. Belarusian St. Univ. Ser. 2]. 2011. No. 2. P. 45–49.

Zobkov M. B., Zobkova M. V. Ustroistvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotokhimicheskimi persul'fatnymi oksidatsiyami v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskimi detektirovaniem [Device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in a continuous gas flow system and FTIR spectrometric detection]. *Zavodskaya lab. Diagnostika mat.* [Factory lab. Mat. diagnostics]. 2015. No. 8. P. 10–15.

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status. *Freshwat. 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. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2010. Vol. 37, no. 6. P. 842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102

Received July 13, 2020

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Леонов Александр Васильевич**

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

### **Зобкова Мария Валентиновна**

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

## **CONTRIBUTORS:**

### **Leonov, Alexander**

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky 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 504

## ДИНАМИКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА НАРВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (ПО ДАННЫМ 2011–2019 гг.)

Г. Т. Фруммин<sup>1,2</sup>, М. А. Мурадлы<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрена динамика трофического статуса российской части акватории Нарвского водохранилища за период 2011–2019 гг. Для оценки трофического статуса использованы следующие показатели: индекс трофического состояния, концентрация хлорофилла *a*, концентрация фосфора общего. Установлено, что в обозначенный период водоем характеризуется как эвтрофный.

Ключевые слова: Нарвское водохранилище; эвтрофирование; трофический статус.

### G. T. Frumin, M. A. Muradly. DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF THE NARVA STORAGE RESERVOIR (2011–2019)

The dynamics of the trophic status of the Narva storage reservoir for the period 2011–2019 was studied. The following indicators were used to assess the trophic status: trophic status index (ITS), chlorophyll *a* concentration, and total phosphorus concentration. It was found that for the period 2011–2018 the trophic status of the Russian part of the Narva reservoir was characterized as eutrophic.

Key words: Narva storage reservoir; eutrophication; trophic status.

### Введение

Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО началась активная деятельность, связанная с мониторингом внутренних вод и контролем за эвтрофированием водоемов земного шара. Эта работа проводится в разных странах и на разных континентах [Дмитриев, Фруммин, 2004, с. 103]. Актуальность проблемы в РФ обусловлена наличием в стране множества трансграничных (международных) водных объектов [Тимофеева, Фруммин,

2017]. К настоящему времени разработано более двадцати критериев оценки трофического статуса водных объектов [Дмитриев, 1995].

Использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона, не сняло проблему оценки трофности водной экосистемы. Так, например, при изучении глубоких водохранилищ США исследователи использовали 22 индекса (как химических, так и биологических), и одно из водохранилищ Техаса было отнесено ими к классу олиготрофных по 11 индексам, к классу мезотрофных по 4 индексам и к классу

эвтрофных по 7 индексам [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990].

Таким образом, вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; единственного индекса трофического состояния; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоемов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для оценки водных экосистем транзитного типа, а также в случаях проведения идентификации трофического статуса водоема по натурным исследованиям одного года (сезона, съемки).

Цель исследования – оценка динамики трофического статуса российской части акватории Нарвского водохранилища за период 2011–2019 гг. на основе применения трех различных показателей трофического статуса.

## Материалы и методы

Нарвское водохранилище – трансграничный водный объект на реке Нарве и ее притоке Плюссе, расположенный на границе РФ и Эстонии (табл. 1, рис. 1). Регулярный гидрохимический мониторинг российской части акватории Нарвского водохранилища проводит ФГУ «Балтводхоз».

В данной работе трофический статус Нарвского водохранилища оценивали, используя три показателя: индекс трофического состояния (Index of trophical state, ITS), концентрация хлорофилла *a*, концентрация общего фосфора.

ITS рассчитан по следующей формуле [Алексеев и др., 2007; Булгаков, Шишкин, 2008]:

$$ITS = \frac{\sum_{i=1}^n pH_i}{n} + a \left( 100 - \frac{\sum_{i=1}^n [O_2]_i}{n} \right), \quad (1)$$

где  $pH_i$  – рН, измеренный за определенный период;  $[O_2]$  – кислород, в процентах насыщения;  $n$  – количество измерений;  $a$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i \cdot [O_2]_i) - \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i) \cdot \sum_{i=1}^n ([O_2]_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n [O_2]_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n [O_2]_i)^2}{n}}. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов по формулам (1) и (2) была разработана специальная компьютерная программа.

Уровень трофического статуса оценивали, используя классификацию, приведенную в табл. 2 [Фрумин, Хуан, 2012].

Результаты расчетов ITS, концентрации хлорофилла *a* и фосфора общего представлены в табл. 3.

## Результаты и обсуждение

В последней строке табл. 3 приведены усредненные за период 2011–2019 гг. показатели, характеризующие трофический статус Нарвского водохранилища (9,2 для ITS, 9,6 мкг/дм<sup>3</sup> для хлорофилла *a* и 46,1 мкг/дм<sup>3</sup> для фосфора общего). Сопоставление этих величин с критериями трофического статуса (табл. 2) приводит к заключению, что российскую часть акватории Нарвского водохранилища можно идентифицировать как эвтрофный водоем.

Таблица 1. Морфометрические характеристики Нарвского водохранилища

Table 1. Morphometric description of the Narva storage reservoir

Площадь Area	191,4 км <sup>2</sup> 191.4 km <sup>2</sup>
Объем Volume	0,365 км <sup>3</sup> 0.365 km <sup>3</sup>
Полезная емкость Useful capacity	91 млн м <sup>3</sup> 91 million m <sup>3</sup>
Распределение акватории между странами Distribution of water area between the countries	Россия > 150 км <sup>2</sup> , Эстония 40 км <sup>2</sup> Russia > 150 km <sup>2</sup> , Estonia 40 km <sup>2</sup>
Нормальный подпорный уровень Normal retaining level	25 м 25 m
Наибольшая глубина Greatest depth	15 м 15 m
Средняя глубина Average depth	1,8 м 1.8 m
Площадь бассейна Pool area	55 848 км <sup>2</sup> 55,848 km <sup>2</sup>

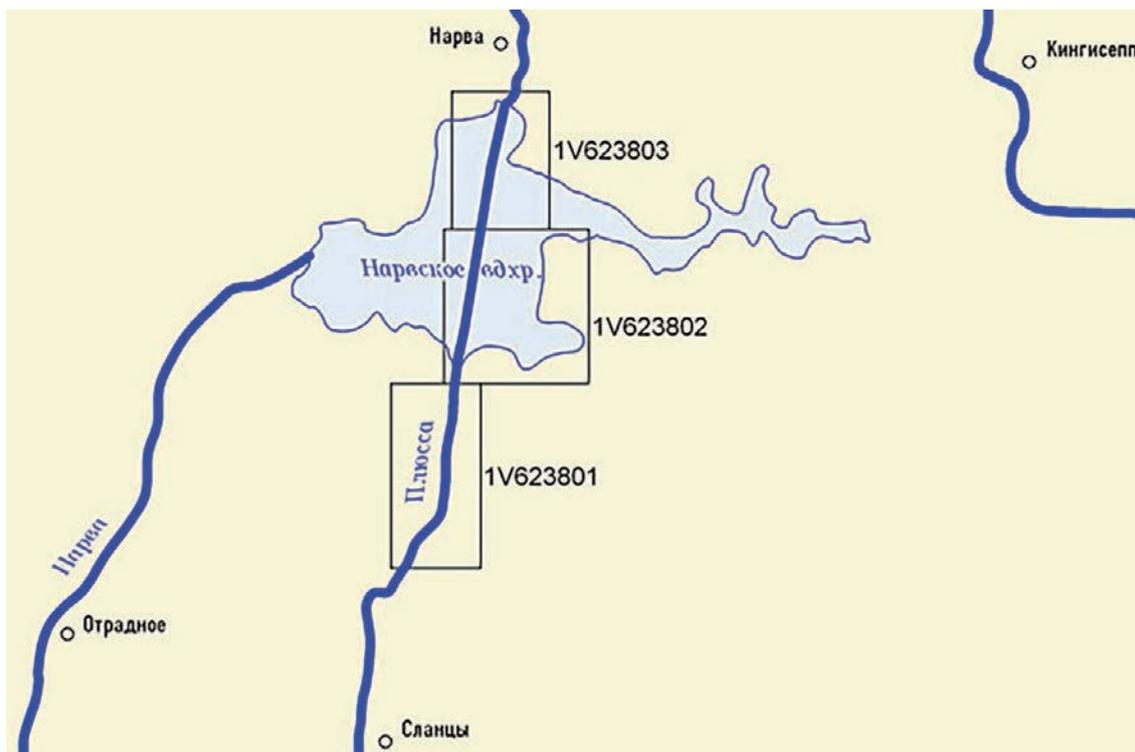


Рис. 1. Карта-схема Нарвского водохранилища

Fig. 1. Schematic map of the Narva reservoir

Таблица 2. Классификация критериев трофического статуса

Table 2. Classification of criteria for trophic status

Трофический статус Trophic status	ITS	Хлорофилл а, мкг/дм <sup>3</sup> Chlorophyll a, µg/dm <sup>3</sup>	Фосфор общий, мкг/дм <sup>3</sup> Total phosphorus, µg/dm <sup>3</sup>
Ультраолиготрофный Ultraoligotrophic	6,3 ± 0,3	< 1	< 4
Олиготрофный Oligotrophic	7,0 ± 0,3	< 2,5	< 10 < 10
Мезотрофный Mesotrophic	7,7 ± 0,3	2,5–8	10–35
Эвтрофный Eutrophic	> 8,3 ± 0,3	8–25	35–100
Гипертрофный Hypertrophic	-	> 25	> 100

Таблица 3. Динамика показателей, характеризующих трофический статус Нарвского водохранилища

Table 3. Dynamics of the indicators characterizing the trophic status of the Narva reservoir

Год Year	ITS	Хлорофилл а, мкг/дм <sup>3</sup> Chlorophyll a, µg /dm <sup>3</sup>	Фосфор общий, мкг/дм <sup>3</sup> Total phosphorus, µg /dm <sup>3</sup>
2011	8,4	19,6	50
2012	9,0	7,3	36
2013	8,8	10,1	45
2014	9,4	13,3	55
2015	9,5	4,9	30
2016	9,9	7,3	49
2017	10,2	5,9	64
2018	9,4	10,3	45
2019	8,3	7,3	41
Среднее Average	9,2	9,6	46,1

Высокий трофический статус Нарвского водохранилища обусловлен значительными концентрациями фосфора общего, то есть лимитанта первичной продукции. К примеру, средняя концентрация фосфора общего за период 2011–2019 гг. составляла 46,1 мкг/дм<sup>3</sup>.

Исследование зависимости трофического уровня водоема от количества поступающего в него фосфора привело к развитию так называемой нагрузочной концепции, в основу которой положено представление о существовании количественной связи между величиной поступления фосфора и реакцией водоема. Результатом этого, как правило, является изменение положения водоема на трофической шкале. Р. Фолленвайдером [Vollenweider, 1968] предложено первое приближение величины фосфорной нагрузки ( $L_{кр}$ , г P/м<sup>2</sup>·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, в расчете которой в качестве стандартного параметра используется только средняя глубина водоема ( $H_{ср}$ , м):

$$L_{кр} = 0,025 \cdot H_{ср}^{0,6}. \quad (3)$$

Результаты расчетов по формуле (3) для основных водоемов Псковско-Чудского озера комплекса приведены в табл. 4.

Их следует рассматривать как ориентировочные, поскольку они получены без учета времени водообмена водного объекта, независимости биогенной нагрузки от поступления биогенных элементов (БЭ) из донных отложений и седиментационного фактора, учитывающего удержание БЭ в водоеме.

Для расчетов поступления (экспорта) фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы использована следующая формула:

$$Q = 0,0315 \cdot C_{ср} \cdot R_{ср}, \quad (4)$$

где  $Q$  – поступление, т/год,  $C_{ср}$  – среднегодовая концентрация биогенного элемента, мкг/дм<sup>3</sup>,  $R_{ср}$  – среднегодовой расход воды, м<sup>3</sup>/с.

Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Как следует из данных, приведенных на рис. 2, в среднем за период с 2011 по 2019 г. экспорт фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы (428 т/год) превышал критическую фосфорную нагрузку (6,9 т/год) в 62 раза. Это означает, что необходимо принимать срочные управленческие решения по снижению фосфорной нагрузки на водохранилище со стоком рек и с водосбора.

Таблица 4. Критические нагрузки фосфором общим на основные водоемы Псковско-Чудского озера комплекса (ориентировочно)

Table 4. Critical loads of total phosphorus on the main water bodies of the Pskov-Chudskoye lake complex (roughly)

Водоем Water body	Средняя глубина, Н, м Average depth, Н, m	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>	$L_{кр}$ , г P/м <sup>2</sup> ·год $L_{кр}$ , g P/m <sup>2</sup> ·year	Критическая нагрузка, т/год Critical load, tons/year
Псковское озеро Pskov lake	3,0	709	0,048	34
Чудское озеро Lake Peipsi	8,3	2611	0,089	232
Нарвское водохранилище Narva reservoir	1,8	191,4	0,036	6,9

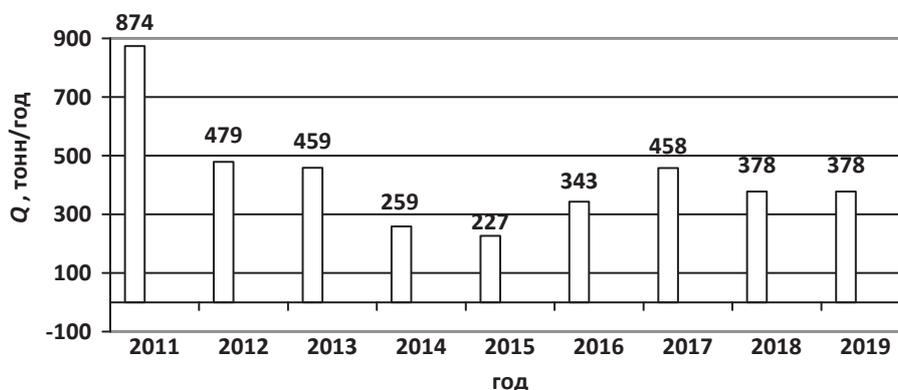


Рис. 2. Динамика поступления фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы

Fig. 2. Dynamics of total phosphorus input into the Narva reservoir with the flow of the Narva River

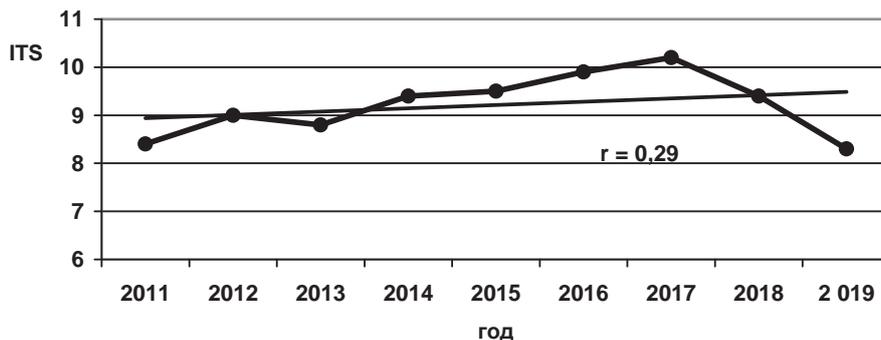


Рис. 3. Динамика величин ITS.

Здесь и далее: прямая линия – линия тренда

Fig. 3. Dynamics of ITS values.

Hereinafter: the straight line – trend line

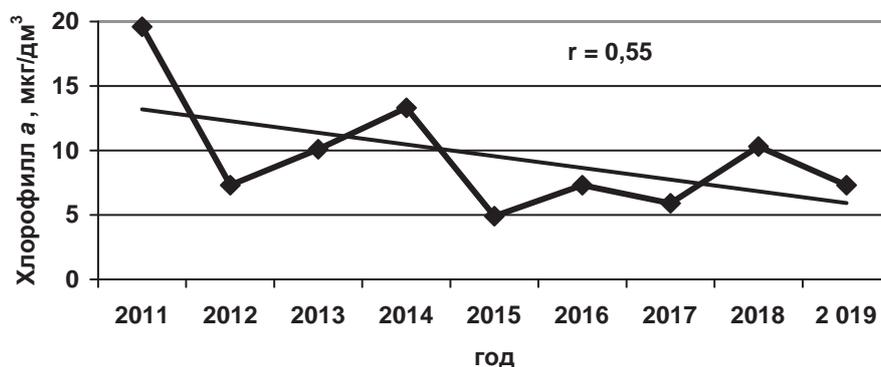


Рис. 4. Динамика концентраций хлорофилла а

Fig. 4. Dynamics of chlorophyll a concentrations

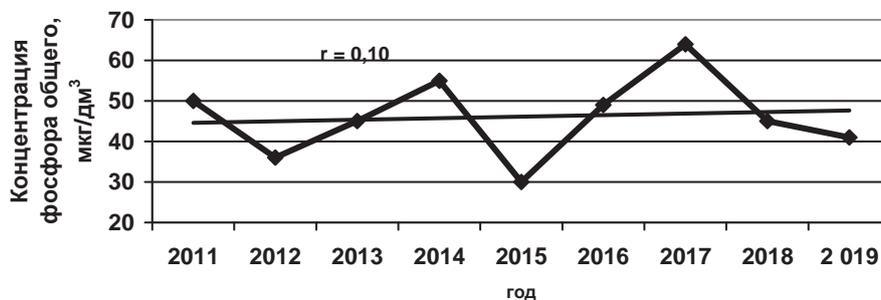


Рис. 5. Динамика концентраций фосфора общего

Fig. 5. Dynamics of total phosphorus concentrations

Дополнительно к вышеизложенному определены линейные тренды ITS, концентраций хлорофилла а и фосфора общего за период 2011–2019 гг. (рис. 3–5). Для качественной оценки трендов использована шкала Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002].

На рис. 3–5 приведены коэффициенты корреляции и линии трендов. Согласно шкале Чеддока эти данные могут быть интерпретированы следующим образом: для ITS тренд «слабый» положительный, для хлорофилла а – «заметный» отрицательный, для фосфора общего – «слабый» положительный.

## Выводы

1. В среднем за период 2011–2019 гг. российская акватория Нарвского водохранилища характеризуется как эвтрофный водоем. Высокий трофический статус водохранилища обусловлен высокими концентрациями фосфора общего, то есть лимитанта первичной продукции.

2. За период 2011–2019 гг. для индекса трофического состояния этого водоема зафиксирован «слабый» положительный тренд, для концентраций хлорофилла а – «заметный» отри-

цательный тренд, для концентраций фосфора общего – «слабый» положительный тренд.

3. Необходимы срочные управленческие решения по снижению фосфорной нагрузки на Нарвское водохранилище со стоком рек и с водосбора.

*Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009.*

## Литература

*Алексеев М. И., Цветкова Л. И., Копина Г. И.* Методика расчетов региональных нормативов экологического благополучия водных объектов (Невской губы и восточной части Финского залива). СПб.: СПбГАСУ, 2007.

*Булгаков И. П., Шишкин А. И.* Применение нового показателя трофического состояния водоема для решения инженерных задач // Сб. тезисов IX Меж-

дунар. экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: Диалог, 2008. С. 495–496.

*Дмитриев В. В.* Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: СПбГУ, 1995. 215 с.

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

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

*Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т.* Трансграничные водные объекты. СПб.: СпецЛит, 2017. 159 с.

*Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж.* Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

*Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р.* Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

*Vollenweider R. A.* Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

*Поступила в редакцию 20.08.2020*

## References

*Alekseev M. I., Tsvetkova L. I., Kopina G. I.* Metodika raschetov regional'nykh normativov ekologicheskogo blagopoluchiya vodnykh ob'ektov (Nevskoi guby i vostochnoi chasti Finskogo zaliva) [A method for calculating regional standards for the ecological well-being of water bodies (Neva Bay and the eastern part of the Gulf of Finland)]. St. Petersburg: SPbGASU, 2007.

*Bulgakov I. P., Shishkin A. I.* Primenenie novogo pokazatelya troficheskogo sostoyaniya vodoema dlya resheniya inzhenernykh zadach [Application of a new indicator of the trophic state of a reservoir for solving engineering problems]. Sb. tezisov IX Mezhdunar. ekol. foruma «Den' Baltiiskogo morya» [Proceed. IX Int. environ. forum *Baltic Sea Day*]. St. Petersburg: Dialog, 2008. P. 495–496.

*Dmitriev V. V.* Diagnostika i modelirovanie vodnykh ekosistem [Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems]. St. Petersburg: SPbGU, 1995. 215 p.

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

*Frumin G. T., Kuan Zh.-Zh.* Veroyatnostnaya otsenka troficheskogo statusa vodnykh ob'ektov. Metod. posobie [Probabilistic assessment of the trophic status of water bodies. Guidelines]. St. Petersburg: RGGMU, 2012. 28 p.

*Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R.* Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and regulation of man-induced eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.

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

*Timofeeva L. A., Frumin G. T.* Transgranichnye vodnye ob'ekty [Transboundary water bodies]. St. Petersburg: SpetsLit, 2017. 159 p.

*Vollenweider R. A.* Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

*Received August 20, 2020*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Фрумин Григорий Тевелевич**

профессор Департамента науки, технологий и инноваций,  
д. х. н., проф.

Российский государственный гидрометеорологический  
университет  
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007

профессор, 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

### **Мурадлы Метин Азерчинович**

магистр II курса кафедры геоэкологии, природопользования  
и экологической безопасности

Российский государственный гидрометеорологический  
университет  
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007  
эл. почта: metin.muradlu.97@mail.ru

## **CONTRIBUTORS:**

### **Frumin, Grigory**

Russian State Hydrometeorological University  
79 Voronezhkaya 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

### **Muradly, Metin**

Russian State Hydrometeorological University  
79 Voronezhkaya St., 192007 St. Petersburg, Russia  
e-mail: metin.muradlu.97@mail.ru

УДК 553.9:556.31 (47022)

## **РОЛЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ (ШУНГИТСОДЕРЖАЩИХ) ПОРОД В ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ**

**Г. С. Бородулина<sup>1</sup>, С. А. Светов<sup>2</sup>, И. В. Токарев<sup>3</sup>, М. А. Левичев<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

<sup>3</sup> РЦ РДМИ Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, Россия

Изучение подземных вод в области распространения высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород Онежской структуры и лабораторные эксперименты по взаимодействию их с водой показали, что причиной формирования сульфатных вод являются сульфиды, широко представленные в высокоуглеродистых породах. Кислородные условия инициируют процесс окисления сульфидов и образование растворимых сульфатов. В зависимости от стадии процесса, минерального состава вмещающих пород и условий миграции подземные воды, имея доминирующий сульфатный тип, приобретают различные значения pH, варьирующий состав и спектр микроэлементов. Кислые стоки, формирующиеся при разработке шунгитсодержащих пород, могут привести к негативным экологическим последствиям. В отдельных случаях концентрации сульфатов, железа и других рудогенных элементов ограничивают применение воды для питьевых целей, но иногда формируют минеральные лечебные воды. Данный тип вод, вероятнее всего, связан с растворением накопленных в период последнего Валдайского оледенения продуктов окисления сульфидов с последующей нейтрализацией кислотности за счет взаимодействия с вмещающими породами.

**Ключевые слова:** высокоуглеродистые шунгитсодержащие породы; сульфиды; окисление; подземные воды; сульфатный тип.

### **G. S. Borodulina, S. A. Svetov, I. V. Tokarev, M. A. Levichev. THE ROLE OF HIGH-CARBON (SHUNGITE-BEARING) ROCKS IN FORMING THE COMPOSITION OF SUBSURFACE WATER IN THE ONEGA STRUCTURE**

The study of subsurface water in the high-carbon (shungite-bearing) rock area of the Onega structure and laboratory experiments on interactions between the rock and water showed that sulfides widely present in high-carbon rocks are the cause of the formation of sulfate-type waters. Oxidic conditions initiate the oxidation of sulfides and the formation of soluble sulfates. Depending on the stage of the process, the mineral composition of the host rock and the migration conditions, the subsurface water, being predominantly of the sulfate type, acquires different pH values and a varying composition and spectrum of trace elements. Acid effluents formed during the open mining of shungite-bearing rock can have negative environmental consequences. In some cases, the concentrations of sulfates, iron and other ore elements limit the usability of the water for drinking purposes, but sometimes they form mineral healing water. This type of water

is most likely associated with the dissolution of sulfide oxidation products accumulated during the Late Weichselian glaciation, followed by neutralization of acidity due to interaction with the host rock.

**Key words:** high-carbon shungite-bearing rocks; sulfide; oxidation; groundwater; sulfate type.

## Введение

Известно, что основным фактором, определяющим химический тип подземных вод, выступает темп водообмена [Шварцев и др., 2007]. На кристаллических щитах тип подземных вод может напрямую зависеть от минералогического состава вмещающих пород и формироваться на начальных стадиях их взаимодействия. Это возможно только в случае присутствия в горных породах хорошо растворимых минеральных образований, например, продуктов окисления сульфидов. В результате формируется специфический сульфатный, как правило, кислый тип вод.

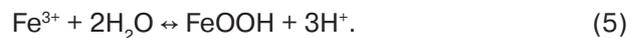
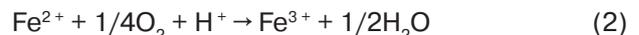
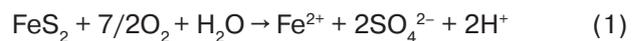
В целом для Карелии сульфатные воды являются редкими на фоне преобладания  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Mg(Mg-Ca) состава вод. Однако в пределах Толвуйской и Мунозерской синклиналей Онежской структуры на участках развития высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород распространены подземные воды с повышенной минерализацией, варьирующими величинами рН и с преобладанием сульфатов в анионном составе [Бородулина, Мазухина, 2005; Бородулина, Левичев, 2019].

Возможно, на отдельных участках Онежской структуры сульфатные воды находятся на начальном этапе формирования химического состава. На это указывает минимальное, среди прочих, содержание растворенного гелия, а также изотопный состав подземной воды и содержание трития, близкое к среднегодовому составу современных атмосферных осадков [Токарев и др., 2015]. Данное предположение согласуется с тем фактом, что в экспериментах с высокоуглеродистыми (шунгитсодержащими) породами (максовитами, по классификации [Филиппов, 2002]) при контакте их с водой кислая сульфатная среда формируется быстро, в течение первых часов – суток [Бородулина, Рыжиков, 2008; Рожкова и др., 2012]. В природных условиях наиболее высокие концентрации сульфатов и рудогенных элементов в кислых растворах обнаружены в районах ведения горных работ, где обеспечивается прямое взаимодействие атмосферных осадков с сульфидными и шунгитсодержащими породами [Бородулина, Иешина, 1998; Кулакова, Лозовик, 2012; Болтыров и др., 2015].

Данная статья посвящена решению вопроса о генезисе вод, содержащих продукты окисления сульфидов и встречающихся преимущественно в районах распространения высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород Карелии.

## Принципы формирования химического состава подземных вод при окислении сульфидов

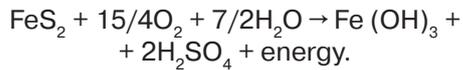
Механизмы окисления сульфидов, а также миграции вторичных продуктов окисления широко исследуются [Nordstrom, 1982; Evangelou, 1998; Rose, Cravotta, 1998; Nordstrom, Alpers, 1999; Alpers et al., 2000; Rimstidt, Vaughan, 2003; Юргенсон, 2009; Lottermoser, 2010; Lottermoser, 2017]. Как правило, разложение сульфидов является многоступенчатым биогеохимическим процессом, включающим гидратацию, гидролиз, окисление, а также микробный и автокатализ. Скорость возникновения и характер вторичных продуктов зависит от многих факторов, в первую очередь от температуры, влажности и условий поступления кислорода к поверхности минералов группы сульфидов. Основные этапы окисления и преобразования вторичных продуктов можно представить в виде системы упрощенных уравнений (на примере пирита) [Dold, Fontboté, 2001; Lottermoser, 2010, 2017]:



Начальная стадия окисления (уравнения 1, 2) начинается в присутствии кислорода при  $\text{pH} \approx 6$ , когда образуется ион  $\text{Fe}^{2+}$ , а затем  $\text{Fe}^{3+}$ . В окислительной среде  $\text{Fe}^{3+}$  гидролизует при  $\text{pH} > 3$  и его концентрация лимитируется осаждением гидроксидов и оксигидроксидов железа (уравнения 4, 5). При наличии  $\text{Fe}^{3+}$  в растворе происходит автоокисление сульфида (уравнение 3), при этом  $\text{Fe}^{3+}$  оказывается более мощным окислителем, чем кислород. Указанные выше реакции катализируются микробным действием, в первую очередь хемолитотроф-

ными Fe- и S-окисляющими бактериями. Поэтому, когда окисление достигает продвинутой стадии, возникает циклический ход между восстановленной и окисленной формами [Kleinmann et al., 1981].

Окисление пирита, приводящее к появлению гидроокислов железа и серной кислоты, записывается обобщенным уравнением [Lottermoser, 2010]:



Нейтрализация кислотности, например, в случае наличия карбонатов и алюмосиликатов приводит к осаждению сульфатов и гидроксидов железа [Alpers et al., 2000; Blodau, Gatzek, 2006; Knorr, Blodau, 2007; Lottermoser, 2017]. Общая тенденция заключается в том, что при смене потенциала системы с восстановительного на окислительный первым обычно появляется мелантерит  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , затем смешанные минералы  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$  и наконец минералы  $\text{Fe}^{3+}$ , в частности ярозит  $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH}))$  [Nordstrom, 1982; Nordstrom, Alpers, 1999; Alpers et al., 2000; Елохина, Рыженко, 2014].

Эксперименты показали, что при окислении колчеданных руд минералы группы мелантерит-роценит образуются в кислородных условиях в считанные часы [Компанченко и др., 2017].

Химический состав подземных вод в области протекания реакции окисления сульфидов определяется поведением промежуточных продуктов, влиянием полупроводящей поверхности окисляющегося пирита, наличием катионов металлов, условиями доступности кислорода и т. д. Следует подчеркнуть, что одним из важных факторов при окислении сульфидов выступает морфология минерала. Установлено, что наиболее реакционно активным оказывается фрамбоидный пирит – кубические агрегаты микроразделов размером около 1–10 мкм, формирующие сфероидальные скопления [Rust, 1935]. Фрамбоидный пирит является основной формой пиритизации черных сланцев, образующейся вследствие бактериальной сульфатредукции в присутствии органики [Butler, Rickard, 2000; Астафьева и др., 2005; Лукин, 2005]. Присутствие такого пирита используется для оценки кислотообразующего потенциала угольных и рудных шахт [Lottermoser, 2017].

## Объекты исследования

Высокоуглеродистые (шунгитсодержащие) породы Карелии представлены осадочными (алевролиты, аргиллиты, карбонаты) и вулка-

ногенно-осадочными породами (туфы песчанистой, алевритовой и пелитовой размерности), в которых присутствует значительная примесь органического углерода  $C_{\text{орг}} = 1\text{--}80 \text{ мас. \%}$  (здесь и далее классификация высокоуглеродистых пород дается с упрощениями [по: Филиппов, 2002; Онежская..., 2011; Филиппов, Дейнес, 2018]). Обладая широкими перспективами использования в промышленности, высокоуглеродистые (шунгитсодержащие) породы требуют комплексного минералого-геохимического изучения. При этом основной технологической проблемой их использования является гетерогенность минерального состава (в пределах как единой толщи, так и залежи), вызывающая значительные вариации их физических свойств.

Наиболее широко палеопротерозойские породы, содержащие метаморфизованное органическое вещество, развиты в Онежской структуре и приурочены к верхней подсвите людиковийского надгоризонта возрастом 2100–1920 млн лет. Разрез людиковия, имеющего мощность около 1 км, представлен базальтами и пикробазальтами в переслаивании с осадочными породами – песчаниками, алевритами, аргиллитами, карбонатами, лидитами [Филиппов, 2002]. Осадочные породы содержат углерод ( $C_{\text{орг}} < 20 \text{ мас. \%}$ ), в них сохраняются первичные текстуры (в виде тонкой слоистости) и присутствует неоднородная по интенсивности сульфидная минерализация. Пирит может быть сингенетического (кристаллы, прослойки, линзы и отдельные конкреции) и эпигенетического (порфиробласты и жилы) происхождения. При этом фрамбоиды пирита [Кевлич и др., 2005; Куликова, Куликов, 2012] и признаки жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий были ранее установлены в изучаемых шунгитсодержащих породах [Филиппов, Дейнес, 2018].

Районы исследования расположены в пределах центральной и западной части Северо-Онежского синклинория (рис. 1). Подземные воды данной территории приурочены к палеопротерозойским вулканогенно-осадочным образованиям ятулия, людиковия и калевия, перекрытым четвертичными отложениями неоднородного состава в основном небольшой мощности. Трещиноватые породы характеризуются изменчивыми и, как правило, низкими фильтрационными свойствами. Воды кристаллических пород и рыхлых отложений гидравлически связаны. Основной приток вод в скважины происходит из верхней части разреза. Питаются подземные воды исключительно за счет инфильтрации атмосферных осадков.

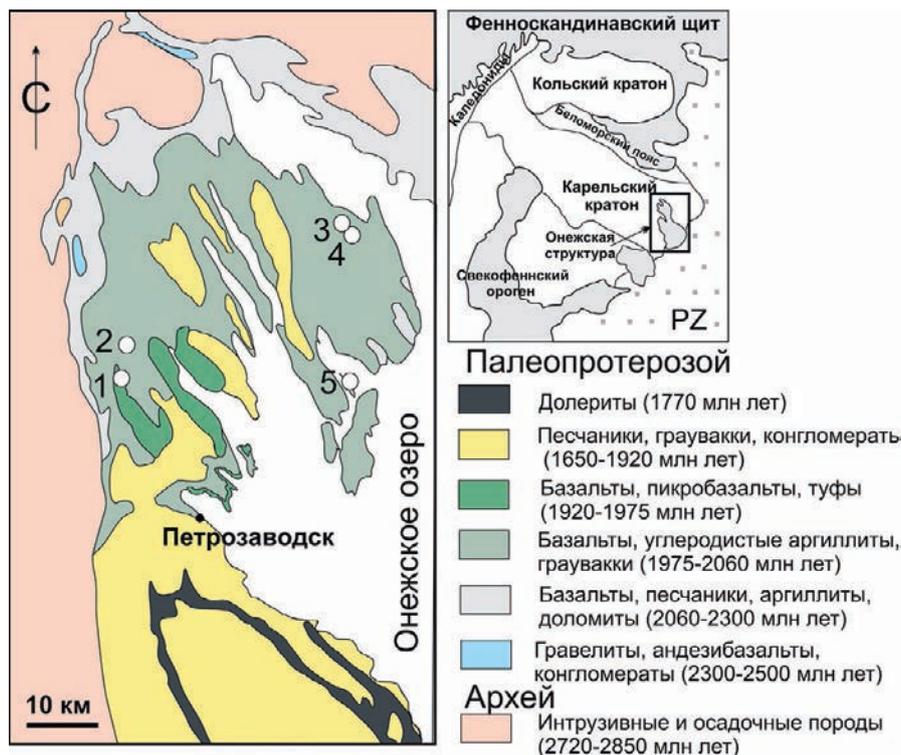


Рис. 1. Геологическое строение Онежской структуры и расположение объектов исследования (модифицировано по: Svetov et al., 2020):

1 – месторождение «Марциальные воды»; 2 – родник у оз. Мунозеро, 3 – Максовская залежь, 4 – Зажогинская залежь, 5 – скважина на о. Кизи

Fig. 1. Geology of the Onega structure and location of the research objects (modified according to Svetov et al., 2020):

1 – 'Marcial waters' area; 2 – spring near Lake Munozero, 3 – Maksovo Deposit, 4 – Zazhigino Deposit; 5 – borehole on Kizhi island

Подземные воды, как правило, безнапорные, лишь на локальных участках, где в покровных отложениях преобладают слабопроницаемые породы, приобретают местный напор.

Месторождение минеральных вод «Марциальные воды», послужившее при Петре I основой для учреждения первого русского курорта, приурочено к Мунозерской синклинали. Структура сложена вулканитами базальтового ряда, а также высокоуглеродистыми алевролитами, пелитами, доломитами и кремнистыми туффитами. Подземные воды приурочены к маломощным четвертичным песчано-гравийным отложениям, трещиноватым шунгитсодержащим пиритизированным сланцам, базальтам и долеритам. Пирит во вмещающих породах частично (в виде оторочек) или полностью замещен ярозитом [Филиппов, 2002]. На водоразделах и склонах подземные воды безнапорные, а в долине руч. Раударгия, протекающего по Равболоту и впадающего в оз. Габозеро, воды приобретают напор. Эксплуатационные скважины изливают с дебитом 0,1–1 л/сек, под

склоном и на болоте наблюдаются выходы железистых подземных вод (небольшие родники, мочажины, ламба). В 9 км от курорта на восточном берегу оз. Мунозеро известен крупный родник с железистой водой.

Зажогинская и Максовская залежи шунгитсодержащих пород расположены в междуречье р. Царевка и руч. Калей в 2 км от Онежского озера. В пределах Толвуйской синклинали, где водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватым высокоуглеродистым породам, перекрыт слабопроницаемыми вулканитами долерит-базальтового комплекса, многие разведочные скважины изливались до начала эксплуатации карьеров. Почти все месторождение перекрыто четвертичными отложениями карельского ледникового горизонта. Мощность четвертичных отложений на большей части площади не превышает 5 м. Трещиноватые породы характеризуются очень изменчивыми и в основном низкими фильтрационными свойствами, по этой причине бездействуют водозаборные скважины в пос. Толвужа, Пуданцев



Рис. 2. Места отбора проб воды в Максовском карьере (26.06.2015, фото Н. В. Кулик): слева – проточный режим; в центре – застойный режим; справа – продукты окисления сульфидов  
 Fig. 2. Water sampling sites in the Maksovo quarry (26.06.2015, photo by N. V. Kulik): on the left – flow regime; in the center – stagnant regime; on the right – products of sulfides oxidation

Бор, Толвуйский Бор. Месторождение разрабатывается открытыми горными выработками, на рис. 2 показан карьер Максово.

### Методика работ

**Полевое опробование.** На месторождении «Марциальные воды» в 2018–2020 г. выполнены ежедневные замеры дебита и температуры воды, а также ежемесячное опробование для определения химического и изотопного состава воды. На месте отбора проб одновременно выполнялось определение pH, Eh и электропроводности. Пробы воды отбирались сифонным методом, герметично закупоривались. Во избежание контакта с воздухом пробы из изливающихся скважин не фильтровались. Пробы на железо фиксировались серной кислотой 4М, на микрокомпоненты – азотной кислотой ОСЧ. Пробы доставлялись в аналитический центр КарНЦ РАН в течение суток.

На площадях Зажогинской и Максовской залежи шунгитсодержащих пород с 1994 г. и до начала эксплуатации карьеров пробы подземной воды отобраны из 12 самоизливающих разведочных скважин. В июне и августе 2015 г. опробованы карьерные воды на Максовской залежи (рис. 2).

**Лабораторные эксперименты.** Для водных вытяжек использован максовит (по классификации [Филиппов, 2002]) Максовской залежи, раздробленный до фракции < 5 мм. Вначале производилась 30-кратная кратковременная (по 5 минут) отмывка дистиллированной водой от мелкодисперсного материала и анализ растворов на pH и электропроводность. Затем отмытый образец высушивался и заливался

природной подземной водой при весовом соотношении порода-вода 1:10 и выстаивался 14 дней. Измерение pH и электропроводности производилось 1 раз в сутки. В исходной воде и конечном растворе определялся химический состав. Ранее для максовитов различных фракций было выполнено определение микроэлементного состава водных вытяжек дистиллированной водой [Бородулина, Рыжаков, 2008].

**Аналитические исследования.** Химический состав вод определен в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН следующими методами:  $\text{HCO}_3^-$ , pH,  $\text{CO}_2$  – потенциометрическим,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , Si,  $\text{P}_{\text{общ}}$  – фотометрическим,  $\text{Cl}^-$  – титриметрическим,  $\text{SO}_4^{2-}$  – турбидиметрическим, Na, K – пламенно-фотометрическим, Ca, Mg, Mn – методом атомно-абсорбционной спектроскопии [Аналитические..., 2017]. Микроэлементный состав определен ICP-MS методом в Центре коллективного пользования КарНЦ РАН по методике: [Светов и др., 2015].

### Результаты и обсуждение

Серия из 30 экстрактов максовита продемонстрировала резкое закисление и рост электропроводности в первых порциях опытных растворов и быструю стабилизацию химических показателей (рис. 3). Вначале происходит удаление продуктов окисления сульфидов, накопленных в породе до начала экспериментов, и быстрое окисление мелкодисперсного материала.

14-суточный контакт отмытого и высушенного максовита с подземной водой ведет к значительному изменению ее исходного химиче-

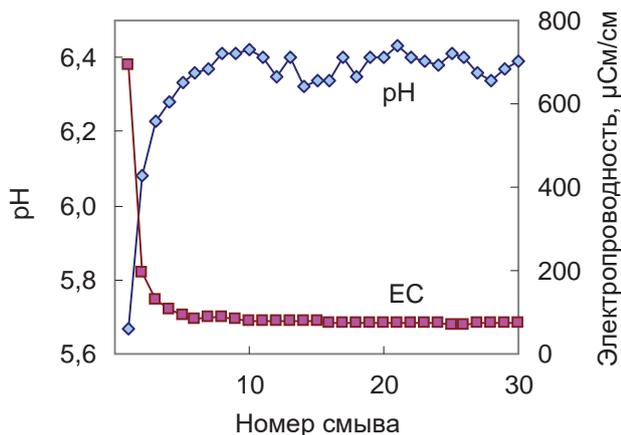


Рис. 3. Изменение pH и электропроводности воды в ходе серии из 30 последовательных промывок максовита из Максовского карьера

Fig. 3. Changes in pH and EC of the water during 30 consecutive washings of maksovite from the Maksovo quarry

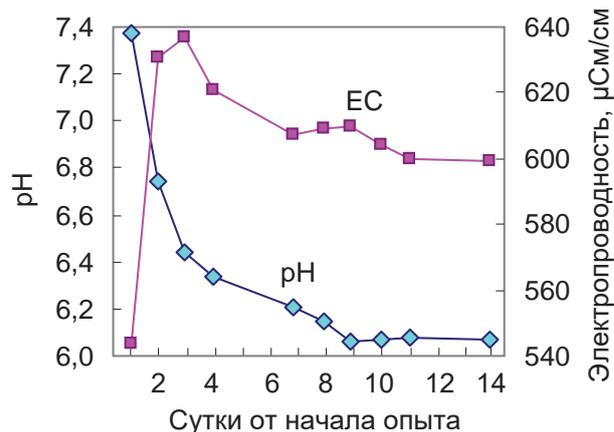


Рис. 4. Изменение электропроводности и pH раствора в ходе 14-дневного контакта с максовитом (состав исходной природной воды – см. табл. 1)

Fig. 4. Changes in EC and pH solution during 14-day contact with maksovite (natural water composition is given in Table 1)

ского состава (табл. 1, рис. 4). Реакция воды смещается в кислую область с постепенной стабилизацией на значении  $\text{pH} \approx 6,1$ , а электропроводность сначала возрастает от 518 до 640  $\mu\text{См}/\text{см}$ , а затем стабилизируется на уровне 600  $\mu\text{См}/\text{см}$ . Контакт подземной воды с максовитом привел к изменению гидрокарбонатного типа воды на сульфатный.

Натурные наблюдения показали, что сульфатные кальциево-магниевые и магниевые кальциевые (иногда железисто-магниевые) подземные воды Онежской структуры (рис. 5) в сравнении с наиболее широко распространенными гидрокарбонатными кальциево-магниевыми водами Карелии характеризуются пониженными показателями pH (в среднем менее 7), высокой минерализацией (до 1 г/л) с максимальной концентрацией сульфатов (до 700 мг/л), повышенным содержанием железа, никеля, кобальта, мышьяка и других рудогенных элементов (табл. 2).

#### Техногенно нарушенные обстановки.

Кислые минерализованные сульфатные воды с высокими Eh соответствуют современному активно протекающему этапу окисления сульфидов в составе вмещающих пород. Этот тип воды широко распространен в районах размещения горнодобывающих предприятий и обычно обнаруживается в пределах угленосных бассейнов, на площадях распространения черных сланцев и колчеданных руд [Куликов и др., 1991]. В Карелии воды, соответствующие активной фазе окисления сульфидов, обнаружены в карьере Костомукшского ГОКа, где из-под отвалов вытекают кислые ( $\text{pH} < 5$ ) воды сульфатного типа и с минерализацией 4–7 г/л [Кулакова, Лозовик, 2012], а также на медно-никелевых месторождениях Печенгской структуры, где карьерные сульфатные воды имеют  $\text{pH} \approx 3$  и минерализацию около 3 г/л [Бородулина, Иешина, 1998; Болтыров и др., 2015].

Таблица 1. Исходный состав подземной воды и состав конечного раствора после 14-дневного контакта с шунгитсодержащей породой (максовит, Максовская залежь)

Table 1. Composition of natural groundwater and the solution (mg / l) after 14-day contact with schungite-bearing rocks (maksovite, Maksovo Deposit)

Проба Sample	Fe <sub>total</sub> , mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/L	Cl <sup>-</sup> , mg/L	Mg <sup>2+</sup> , mg/L	Ca <sup>2+</sup> , mg/L	Na <sup>+</sup> , mg/L	K <sup>+</sup> , mg/L	pH	EC, μS/cm
Исходная вода Groundwater	0,9	27,2	238	42	18	39	48	2,4	8,08	518
Вода через 14 суток взаимодействия с породой Groundwater after 14 days contact with maksovite	0,03	160	32	42	3,6	30	59	3,7	6,10	600

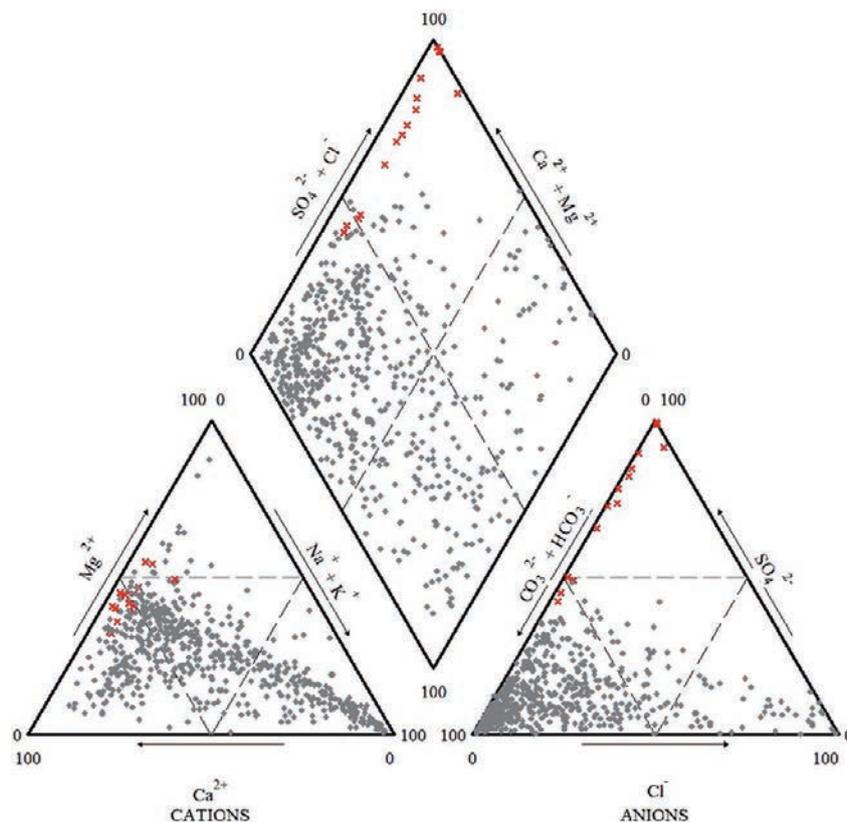


Рис. 5. Химический состав сульфатных вод Онежской структуры (красные значки) среди подземных вод Карелии

Fig. 5. Chemical composition of sulfate waters in the Onega structure (red marks) among the groundwater of Karelia

Таблица 2. Характеристики химического состава подземных вод гидрокарбонатного и сульфатного типов  
Table 2. Chemical composition of groundwater of the bicarbonate and sulfate types

Компоненты Compounds, mg/L	Гидрокарбонатный тип Bicarbonate type		Сульфатный тип Sulfate type			
	Скважины, Карелия Boreholes, Karelia	Скважины, Забогинское месторождение Boreholes, Zazhogino area	Воды карьерного дренажа (Максово), июнь 2015 г. Maksovo quarry drainage waters, June, 2015		Воды карьерного дренажа (Максово), август 2015 г. Maksovo quarry drainage waters, August, 2015	
			среднее n=255 mean	среднее n=14 mean	Точка 1. Проточный режим Point 1. Flow	Точка 2. Застойный режим Point 2. Puddle
pH	7,3	6,8	3,4	7,0	3,1	4,6
Eh, mV	292	195	-	-	653	483
Na <sup>+</sup>	8,1	8,5	9,5	12,2	8,4	6,9
K <sup>+</sup>	2,4	4,8	8,1	16,7	6,8	6,9
Ca <sup>2+</sup>	31	84	156	145	228	146
Mg <sup>2+</sup>	12	33	82	71	119	64
Fe <sub>общ</sub>	0,7	1,2	83	0,01	68,7	59
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	162	125	0	234	0	0
Cl <sup>-</sup>	3,5	14,5	6,6	16,7	8,5	8,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13	178	1160	572	1412	897
SiO <sub>2</sub>	10	12,2	20,1	6,7	19,5	13,3
CO <sub>2</sub>	18	76	-	-	365	136
TDS	254	534	1525	1070	1873	1203



Рис. 6. Последствия разгрузки кислых вод Максовского карьера

Fig. 6. Consequences of acid drainage in the Maksovo quarry

На территории Онежской структуры сульфатные воды представлены только в пределах распространения шунгитсодержащих пород (рис. 4). Пример начальной стадии протекания процесса окисления сульфидов можно наблюдать в районе Максовского карьера высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород – максовитов. Поступающие в карьер подземная и атмосферная воды активно окисляют сульфиды в раздробленной массе внутренних отвалов (рис. 2 и «проточный режим» в табл. 2), образуя кислые стоки, негативно влияющие на окружающую среду (рис. 6). В застойных условиях активно проявляется процесс нейтрализации выщелатов, растворенное железо полностью гидролизуется, образуя интенсивный ярко окрашенный осадок (рис. 2 и «застойный режим» в табл. 2).

**Природные обстановки.** На Зажогинском месторождении сульфатные воды, вскрытые разведочными скважинами, отличаются в основном околонеutralными pH и, соответственно, пониженным содержанием железа (максимум 8 мг/л, в среднем 1,2 мг/л, табл. 2), что указывает на влияние буферной емкости карбонатов и алюмосиликатов в составе вмещающих пород.

Наиболее ярким примером природных сульфатных вод являются минеральные железистые марциальные воды, формирование которых связывают с шунгитсодержащими породами Мунозерской синклинали Онежской структуры

[Лебедев и др., 1935; Бородулина, Левичев, 2019]. По сравнению с сульфатными водами, образующимися на активной стадии окисления сульфидов, марциальные воды оказываются менее минерализованными, обладают околонеutralными  $pH = 6,1-6,4$  при значительном содержании железа в форме  $Fe^{2+}$  (табл. 3). Судя по наблюдениям, начатым в 30-х годах прошлого века, химический состав марциальных вод имеет многолетнюю стабильность.

Напорные марциальные воды формируют свой состав в бескислородных условиях, на что указывают относительно низкие значения окислительно-восстановительного потенциала  $Eh < +200$  мВ. Повышение содержания  $CO_2$ , вероятно, является результатом сернокислотного выщелачивания пород, также не исключаются процессы сульфатредукции. При общем газосодержании 60–80 мл/л концентрация  $CO_2 = 72-76$  об. %, что необычно велико для подземных вод региона. Биогенное окисление сульфидов подтверждается обеднением карбонатной системы углеродом-13 [Иешина и др., 1987] и изотопным составом железа [Дубинина и др., 2012]. Повышенные концентрации  $CO_2$  способствуют удержанию железа в растворе. Рост содержания магния и железа в катионном составе воды по мере увеличения общей минерализации свидетельствует в пользу основного состава вмещающих пород.

Для объяснения условий формирования марциальных вод предполагается несколько

Таблица 3. Химический состав подземных вод Мунозерской синклинали

Table 3. Chemical composition of groundwater in the Munozero syncline

Компоненты Compounds, mg/L	Марциальные воды, 2001–2020 гг., среднее, n=40 Marcial waters, 2001–2020, mean, n=40				Ламба в долине оз. Габозеро Lamba in the valley of Lake Gabozero	Родник в районе оз. Мунозеро Spring near Lake Munozero
	Скв. 1-к Well 1-k	Скв. 2-к Well 2-k	Скв. 3-к Well 3-k	Скв. 4-к Well 4-k		
pH	6,4	6,2	6,1	6,1	6,1	6,5
Eh, mV	+189	+194	+197	+188	+215	+161
Na <sup>+</sup>	3,5	4,7	4,7	5,3	5,2	3,5
K <sup>+</sup>	2,3	4,2	4,6	5,8	3,5	3,5
Ca <sup>2+</sup>	26	43	38	53	34	14
Mg <sup>2+</sup>	15	31	33	50	26	44
Fe <sup>2+</sup>	14	42	55	96	45	35
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	100	122	104	124	77	107
Cl <sup>-</sup>	1,5	2,1	2,5	2,8	6,4	1,8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	75	213	258	432	204	165
SiO <sub>2</sub>	12,9	15,9	16,3	15,9	13	25,4
CO <sub>2</sub>	93	190	226	347	87	
TDS	250	470	540	920	416	425
Формула Курлова Kurlov formula	$\frac{HCO_3 50 SO_4 49}{Ca 4 1 Mg 36 Fe 16}$	$\frac{SO_4 69 HCO_3 30}{Mg 36 Ca 35 Fe 24}$	$\frac{SO_4 76 HCO_3 22}{Mg 36 Fe 3 1 Ca 28}$	$\frac{SO_4 82 HCO_3 16}{Mg 37 Fe 35 Ca 25}$	$\frac{SO_4 76 HCO_3 22}{Mg 37 Ca 29 Fe 25}$	$\frac{SO_4 65 HCO_3 33}{Ca 54 Mg 25 Fe 15}$

вариантов, в том числе: а) современное окисление пиритизированных пород кислородсодержащими водами атмосферного происхождения [Иванов, Невраев, 1964] или б) окисление сульфидов при дефиците воды в зонах аэрации, возможно, в предыдущую холодную климатическую эпоху, и современное растворение продуктов окисления сульфидов [Токарев и др., 2015; Tokarev et al., 2019]. Еще в ходе разведки месторождения Е. Ренгартен предположил, что значительная концентрация железа в воде объясняется не столько современным процессом окисления пирита, «...как процессом выщелачивания древних продуктов окисления пирита из сланцев водой, циркулирующей в коренных породах в настоящее время» [Лебедев и др., 1935].

В пользу второго предположения свидетельствуют многочисленные наблюдения сульфатных кор выветривания по сульфидным рудам в зоне современного развития многолетнемерзлых горных пород [Иванов, 1966; Птицын, 1992; Птицын, Сысоева, 1995; Юргенсон, 1997, 2009; Elberling et al., 2000]. Согласно этим наблюдениям, летом образуются агрегаты ярозита, а зимой в ассоциации со льдом формируются мелантерит и водные сульфаты других металлов. К основным признакам криоминералогенеза авторы относят: а) присутствие сульфатов преимущественно в виде кристаллоги-

дратов и б) преобладание водорастворимых минеральных форм, устойчивых только в условиях дефицита жидкой фазы.

На возможность криогенного генезиса сульфатных минералов, определяющих химический облик марциальных вод, указывают палеорекострукции рассматриваемой территории. Согласно им, в период последнего оледенения в пределах Онежской структуры господствовали сухие морозные условия с глубоким залеганием уровня подземных вод, обусловленным падением регионального базиса эрозии, и отсутствием сплошного ледникового покрова [Филимонова, Климанов, 2005; Демидов и др., 2006]. Газообразный и растворенный в пленочной влаге кислород инициирует окисление сульфидов, при этом в ненасыщенной зоне процесс окисления происходит быстрее, чем в воде [Lottermoser, 2010]. Дефицит жидких осадков в холодном климате способствовал сохранению и накоплению продуктов окисления сульфидов.

Эксплуатационные скважины месторождения «Марциальные воды» располагаются на отметках 69–70 м. Во время отступления последнего ледника 11,6–11,5 тыс. л. н. уровень Онежского приледникового озера поднимался до отметок 120–125 м [Демидов и др., 2006]. Отметки ближайших водоразделов достигают 170 м, то есть в голоцене область питания мар-

циальных вод оставалась на суше. При затоплении территории в массиве пород возникали бескислородные условия, способствовавшие сохранению железа в форме  $Fe^{2+}$ . Долина Габозера находилась под водой до конца пребореала (около 9600–9300 л. н.), когда произошла регрессия Онежского озера и уровень упал до 70–65 м [Демидов и др., 2006]. Дальнейшее увлажнение климата при потеплении способствовало появлению болотной растительности и сохранению  $Fe^{2+}$  при сопутствующей нейтрализации кислотности породообразующими минералами. Не исключен и процесс современного окисления сульфидов в области питания при поступлении инфильтрационных вод (уравнения 1, 2) или автокатализ (уравнение 3) в зонах появления  $Fe^{3+}$ , а также при участии микроорганизмов [Дубинина и др., 2012].

**Микроэлементный состав.** Наличие сульфидов различных металлов в составе вмещающих шунгитсодержащих пород Онежской структуры влечет за собой формирование специфического микроэлементного состава сульфатных подземных вод за счет мобилизации металлов и металлоидов. Концентрации микроэлементов в сульфатных подземных водах варьируют в большом диапазоне значений, но только Mn, Al, Zn, Ni, Sr, V, Ba, Co, As присутствуют в количествах более 1 мкг/л, а содержание Mn, Al, Zn, Ni превышает 100 мкг/л (табл. 4). Концентрации мышьяка (70 мкг/л), никеля (360 мкг/л), кобальта (50 мкг/л) в сульфатных водах Онежской структуры являются максимальными среди исследованных подземных вод Карелии. При этом наблюдаются в целом невысокие, ниже фоновых, значения содержания Ba, V, Cu, Pb. То есть в микроэлементном составе сульфатных подземных вод также проявляется химическая кинетика в цепочке «окисление сульфидов → растворение → установление равновесия с вмещающими породами».

В лабораторных экспериментах обнаружена значительная разница содержания микроэлементов в вытяжках из раздробленной непромытой («свежей») породы и в экстрактах из отмытого материала (табл. 4). Вытяжки из непромытой породы отличаются максимальными концентрациями рудогенных элементов. Некоторые из них достигают миллиграммовых значений (мг/л): Al – 28; Zn – 13; Ni – 9,8; Cu – 3,4; Pb – 1,8; Co – 0,6; Cd – 0,3. Вытяжки из промытой породы имеют концентрации практически всех элементов уже на порядок ниже, чем из «свежей» породы, за исключением Ba и Sr (табл. 4).

В природных условиях обнаруживаются аналогичные распределения. В карьерных сульфатных водах Аллореченского месторождения

концентрация некоторых элементов достигает (мг/л): Ni – 150; Cu – 2; Co – 1,7; Fe – 28; Mn – 26 [Бородулина, Иешина, 1998]. В кислых сульфатных водах, вытекающих из-под отвалов Костомукшского ГОКа, концентрация никеля составляет 4 мг/л, алюминия – 29 мг/л [Кулакова, Лозовик, 2012].

## Выводы

Принципы окисления сульфидных минералов, лабораторные эксперименты и натурные исследования подземных вод Онежской структуры, включающей большое разнообразие высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород, позволяют подразделить формирование сульфатных вод на два этапа:

1) *кислые сульфатные воды* с высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала соответствуют начальным стадиям современного окисления сульфидных минералов и/или растворения продуктов их окисления;

2) *околонейтральные сульфатные воды* с пониженными величинами окислительно-восстановительного потенциала соответствуют различным стадиям взаимодействия вод с вмещающими породами.

Высокоуглеродистые (шунгитсодержащие) породы Онежской структуры содержат минералы группы сульфидов со специфической морфологией и развитой поверхностью (например, фрамбоидальными формами), что ускоряет процессы их окисления, происходящие при поступлении кислородных инфильтрационных вод.

На участках техногенного воздействия (в горнодобывающих районах), где присутствуют свежераздробленные породы, окисление сульфидов и растворение ранее накопленных продуктов их окисления происходит быстро (часы, сутки). Кислые сульфатные растворы с высоким содержанием железа и микроэлементов являются негативным экологическим фактором, требующим регулирующего вмешательства в технологию добычи.

Источником сульфатов в природных водах являются накопленные за геологическое время продукты окисления сульфидных минералов. При длительном контакте сульфатных вод с вмещающими породами происходит нейтрализация кислотности, однако повышенное содержание железа (в форме  $Fe^{2+}$ ) сохраняется за счет бескислородных условий и высоких концентраций  $CO_2$ . В таких водах отмечается также превышение концентрации микроэлементов над региональным фоном. Этот подтип

Таблица 4. Микроэлементный состав подземных вод и вытяжек из шунгитсодержащих пород (максовиты, залежь Максово)

Table 4. Trace elements in groundwater and in extracts from schungite-bearing rocks (maksovite, Maksovo Deposit)

Элементы Elements, µg/L	Захогинское месторождение, скважины, min-max (n=12) Zazhogino boreholes	Марциальные воды, min-max средних (n=19) Marcial waters, min-max of average	Вытяжки из максовита Maksovite extracts		Региональный фон подземных вод Regional groundwater background
			Непромытая порода Raw rock	Промытая порода Water-treated rock	
Ag	<0,01–0,66	0,008–0,012	0,023	0,01	<0,01
Al	1–20	5,7–12,5	28710	1237	35
As	<0,01–48	31–68	3,6	0,1	0,5
B	2–19	19–29	0,5	0,5	10
Ba	17–61	7–17	5,3	11,9	57
Be	<0,02–0,16	0,01–0,11	3,32	0,16	<0,02
Bi	<0,01–6,7	0,001–0,002	0,012	0,01	<0,01
Br	<5–22	7,6–11,4	10,6	5	5
Cd	<0,02–21	0,07–0,18	328	15,3	0,06
Co	0,04–34	7,1–42	615	30	0,18
Cr	0,4–10	0,3–0,4	35,5	0,9	0,9
Cu	0,5–7	0,4–1	3390	297	2,5
Fe, mg/L	0,1–8,2	14,3–95,8	29,1	0,7	0,3
Ga	<0,01–0,16	0,025–0,027	0,38	0,02	0,03
Ge	<0,02–0,17	1,6–4,2	0,7	0,07	0,03
Hg	<0,05–0,19	0,025–0,035	<0,05	<0,05	<0,05
La	0,01–7,3	0,01–0,4	93	16	0,9
Li	0,2–7	8,6–12,7	28,8	2,8	1,9
Mn	0,5–1100	15,6–523	548	29	25
Mo	0,17–7,2	1,3–2,6	0,87	0,09	0,38
Ni	1,2–360	26,5–193	9778	534	2
Pb	0,01–13	0,02–0,05	1833	769	0,7
Rb	0,2–11,6	2,4–4,4	4,6	2,9	1,7
Sb	0,03–0,76	0,03–0,13	7,24	0,87	0,09
Sc	<1–4,5	2,2–2,6	50,8	1,9	2,5
Se	<0,5–1,3	0,6–1,7	46,3	5,1	<0,5
Sn	<0,02–0,08	0,02–0,03	1,19	0,34	0,02
Sr	38–360	40–74	1,0	7,6	81
Th	<0,01–0,05	<0,01–0,05	3,1	0,01	0,01
Ti	1–20	0,9–1,3	2,5	1,2	1,6
Tl	<0,01–0,16	0,07–0,10	0,18	0,09	<0,01
U	0,08–21	0,1–0,29	98,1	7,2	0,09
V	0,14–2,6	0,14–0,24	6,06	0,02	0,4
W	<0,02–0,2	0,02–0,04	0,3	0,02	0,03
Y	0,03–0,94	0,02–0,46	120	5,6	0,17
Zn	7–840	59–263	13111	581	36
Zr	<0,02–0,5	0,02–0,2	0,2	0,03	0,05

сульфатных вод с давних пор используется для бальнеологических целей.

При проведении исследований использовалось оборудование Центра коллективного пользования КарНЦ РАН. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН

за выполнение химических анализов воды и А. С. Парамонову – за выполнение масс-спектрометрических исследований в ИГ КарНЦ РАН.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных про-

блем Севера и Институт геологии КарНЦ РАН) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-45-100004).

## Литература

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

Астафьева М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение // Палеонтологический журнал. 2005. № 5. С. 1–7.

Болтыров В. Б., Селезнев С. Г., Стороженко Л. А. Экологические последствия долговременного хранения техногенных объектов типа «Отвалы Аллареченского месторождения» (Печенгский район Мурманской области) // Известия УГГУ. 2015. № 4(40). С. 27–33.

Бородулина Г. С., Иешина А. В. Техногенное влияние на состав природных вод в районе деятельности ГОКа «Печенганикель» // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия: Тезисы доклада Всерос. совещ. (Апатиты, 22–25 июня 1998 г.). Апатиты, 1998. С. 114–115.

Бородулина Г. С., Левичев М. А. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75. doi: 10.17580/gzh.2019.03.14

Бородулина Г. С., Мазухина С. И. Подземные воды Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 47–55.

Бородулина Г. С., Рыжаков А. В. О возможности использования шунгита для очистки водопроводной воды // Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов: Сб. докл. Апатиты, 2008. Ч. 2. С. 105–108.

Демидов И. Н., Лукашев А. Д., Ильин В. Н. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды КарНЦ РАН. 2006. Вып. 10. С. 22–33.

Дубинина Г. А., Сорокина А. Ю., Гапеева М. В., Долотов А. В. Сообщества нейтрофильных железобактериальных микроорганизмов железистых источников различного генезиса и их участие в фракционировании стабильных изотопов железа // Микробиология. 2012. Т. 81, № 1. С. 96–104.

Елохина С. Н., Рыженко Б. Н. Вторичное минералообразование в природно-техногенных гидрогеологических системах колчеданных месторождений. Моделирование образования фазы  $(\text{Fe}, \text{Mg}) \text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  при окислении сульфидов Дегтярского медно-колчеданного месторождения // Геохимия. 2014. № 2. С. 178–192. doi: 10.7868/S0016752514020058

Иванов В. В., Невраев Г. А. Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 168 с.

Иванов О. П. Основные факторы развития зон окисления сульфидных месторождений в условиях многолетней мерзлоты // Геохимия. 1966. № 9. С. 1095–1106.

Иешина А. В., Поленов И. К., Богачев М. А., Теруков В. С., Логинова Л. Ф., Перская Е. А., Бородулина Г. С. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 151 с.

Кевлич В. И., Галдобина Л. П., Кукушкина П. И., Трошкова Р. А. О кристалломорфологии пирита в шунгитах месторождения Максого // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 86–88.

Компанченко А. А., Волошин А. В., Сидоров М. Ю. Минералы Fe в зоне окисления колчеданных руд Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион: идентификация методом рамановской спектроскопии // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1/1. С. 95–103. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-95-103

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

Куликова В. В., Куликов В. С. Фрамбоиды пирита и других минералов в шунгитах Онежской структуры // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: Труды IX Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвящ. 60-летию ГИ КНЦ РАН. Апатиты: К&М, 2012. С. 274–279.

Куликов Г. В., Жевлаков А. В., Бондаренко С. С. Минеральные лечебные воды СССР. Справочник. М.: Недра, 1991. 399 с.

Лебедев А. Н., Иванов В. В., Ренгартен Е. В., Славянов Н. Н., Вишневецкий С. А. Лечебные местности Карелии / Под ред. проф. М. Д. Тушинского, д-ра А. Н. Лебедева. Петрозаводск: Изд. Наркомздрава АКССР, 1935. 188 с.

Лукин А. Е. О происхождении шунгитов // Геологический журнал. 2005. № 4. С. 28–47.

Онежская палеопротерозойская структура / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Птицын А. Б. Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1992. 120 с.

Птицын А. Б., Сысоева Е. И. Криогенный механизм образования зоны окисления Удокана // Геология и геофизика. 1995. № 3. С. 90–97.

Рожкова В. С., Ковалевский В. В., Кочнева И. В., Лозовик П. А. О возможности использования шунгитовых пород Карелии в водоподготовке // Горный журнал. 2012. № 5. С. 64–67.

Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Михайлова А. И., Рыбникова З. П., Парамонов А. С., Утицина В. Л., Колодей В. С., Эхова М. В. Прецизионный (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

Токарев И. В., Бородулина Г. С., Блаженникова И. В., Авраменко И. А. Условия формирования железистых минеральных вод по изотопно-геохимическим данным (курорт «Марциальные воды», Каре-

лия) // Геохимия. 2015. № 1. С. 88–91. doi: 10.7868/S0016752514110090

Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2002. 277 с.

Филиппов М. М., Дейнес Ю. Е. Субпластовый тип месторождений шунгитов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 261 с.

Филимонова Л. В., Климанов В. А. Изменение количественных показателей палеоклимата в средне-таежной подзоне Карелии за последние 11000 лет // Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем Восточной Фенноскандии. Труды КарНЦ РАН. 2005. Вып. 8. С. 112–120.

Шварцев С. Л., Рыженко Б. Н., Алексеев В. А., Дутова Е. М., Кондратьева И. А., Копылова Ю. Г., Лепкурова О. Е. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2. Система вода – порода в условиях зоны гипергенеза. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.

Юргенсон Г. А. Зона окисления в многолетне-мерзлых породах // Записки ВМО. 1997. Ч. 126, № 5. С. 15–27.

Юргенсон Г. А. Криоминералогенез в техногенных массивах // Минералогия техногенеза-2009. Миасс: Имин УрО РАН, 2009. С. 61–75.

Alpers C. N., Jambor J. L., Nordstrom D. K. (eds). Sulfate minerals: crystallography, geochemistry, and environmental significance. Reviews in mineralogy and geochemistry. 2000. Vol. 40. 608 p.

Blodau C., Gatzek C. Chemical controls on iron reduction in schwertmannite-rich sediments // Chem. Geol. 2006. Vol. 235, iss. 3–4. P. 366–376. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.08.003

Butler I. B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. Vol. 64, iss. 15. P. 2665–2672. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00387-2

Dold B., Fontboté L. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy and mineral processing // J. Geochem. Explor. 2001. Vol. 74. P. 3–55. doi: 10.1016/S0375-6742(01)00174-1

Evangeliou V. P. Pyrite chemistry: the key for abatement of acid mine drainage // Acidic mining lakes: acid mine drainage, limnology and reclamation. Heidelberg: Springer, 1998. P. 197–222. doi: 10.1007/978-3-642-71954-7\_10

Elberling B., Schippers A., Sand W. Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures // J. Contam. Hydrol. 2000. No. 41. P. 225–238. doi: 10.1016/S0169-7722(99)00085-6

Jambor J. L., Blowes D. W., Ptacek C. J. Mineralogy of mine wastes and strategies for remediation // Environ. Mineral. EMU Notes in Mineralogy. 2000. P. 255–290.

Kleinmann R. L. P., Crerar D. A., Pacelli R. R. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation // Mining Eng. 1981. No. 33. P. 300–303.

Knorr K., Blodau C. Controls on schwertmannite transformation rates and products // Appl. Geochem. 2007. Vol. 22, iss. 9. P. 2006–2015. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.04.017

Lottermoser B. G. Environmental indicators in metal mining. Springer Int. Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42731-7

Lottermoser B. G. Mine wastes characterization, treatment and environmental impacts. Third edition. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12419-8

Nordstrom D. K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid Sulfate Weathering. Madison. WI. Soil Sci. Society of America, 1982. P. 37–56.

Nordstrom D. K., Alpers C. N. Geochemistry of acid mine waters // The Environ. Geochem. of Mineral Deposits. Part A. Processes, methods and health issues. Rev. Economic Geologists. 1999. P. 133–160. doi: 10.5382/Rev.06.06

Rimstidt J. D., Vaughan D. J. Pyrite oxidation: A state-of-the-art assessment of the reaction mechanism // Geochim. Cosmochim. Ac. 2003. Vol. 67, iss. 5. P. 873–880. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01165-1

Rose A. W., Cravotta C. A. Geochemistry of coal mine drainage // Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania. The Pennsylvania Dep. Environ. Protection. Pittsburgh, 1998. Ch. 1. P. 1–22.

Rust G. W. Colloidal primary copper ores at Cornwall Mines, Missouri // J. Geol. 1935. Vol. 43. P. 398–426.

Svetov S. A., Chazhengina S. Yu., Stepanova A. V. Geochemistry and texture of clinopyroxene phenocrysts from Paleoproterozoic picobasalts, Onega Basin, Fennoscandian Shield: records of magma mixing processes // Minerals. 2020. Vol. 10(5), 434. doi: 10.3390/min10050434

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic – White Searegion in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) // Quaternary Int. 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

Поступила в редакцию 26.05.2020

## References

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

Asta'eva M. M., Rozanov A. Yu., Khuver R. Frambody: ikh struktura i proiskhozhdenie [Framboids: their

structure and origin]. *Paleontol. zhurn.* [Paleontol. J.]. 2005. No. 5. P. 1–7.

Boltyrov V. B., Seleznev S. G., Storozhenko L. A. Ekologicheskie posledstviya dolgovremennogo khraneniya tekhnogennykh ob'ektov tipa "Otvaly Allarechenskogo mestorozhdeniya" (Pechengskii raion Murmanskoj oblasti) [Ecological consequences of long-term

storage of technogenic objects like “Dumps of the Al-larechensk field” (the Pechengsk area of Murmansk region)]. *Izv. Ural'skogo gos. gornogo univ.* [News Ural St. Mining Univ.]. 2015. No. 4(40). P. 27–33.

*Borodulina G. S., Ieshina A. V.* Tekhnogennoe vliyanie na sostav prirodnykh vod v raione deyatelnosti GOKa “Pechenganikel” [Technogenic impact on the natural waters composition in the area of operation of the Pechenganikel mining and processing complex]. *Antropogennoe vozdeistvie na prirodu Severa i ego ekol. posledstviya: Tezisy dokl. Vseros. soveshch. (Apatity, 22–25 iyunya 1998 g.)* [Man-induced impact on the nature of the North and its ecol. consequences: Proceed. All-Russ. meeting (Apatity, June 22–25, 1998)]. Apatity, 1998. P. 114–115.

*Borodulina G. S., Levichev M. A.* Resursy i geokhimiya podzemnykh vod Karelii [Resources and geochemistry of groundwater in Karelia]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2019. No. 3. P. 71–75. doi: 10.17580/gzh.2019.03.14

*Borodulina G. S., Mazukhina S. I.* Podzemnye vody Zaonezh'ya [Groundwater of Zaonezhye]. *Ekol. probl. osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma* [Ecol. probl. of the Srednyaya Padma deposit development]. Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr, 2005. P. 47–55.

*Borodulina G. S., Ryzhakov A. V.* O vozmozhnosti ispol'zovaniya shungita dlya ochistki vodoprovodnoi vody [On the possible use of shungite for tap water purification]. *Nauch. osnovy khim. i tekhnol. pererabotki kompleksnogo syr'ya i sinteza na ego osnove funktsional'nykh mat.*: Sb. dokl. [Sci. grounds of chem. and technol. for processing complex raw materials and synthesis of functional mat. on its basis: Proceed.]. Apatity, 2008. Ch. 2. P. 105–108.

*Demidov I. N., Lukashev A. D., Il'in V. N.* Rel'ef zapovednika “Kivach” i istoriya geologicheskogo razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v chetvertichnom periode [The relief of the Kivach Reserve and the history of the geological development of the north-western Prionezhye in the Quaternary period]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2006. Iss. 10. P. 22–33.

*Dubinina G. A., Sorokina A. Yu., Gapeeva M. V., Dolutov A. V.* Soobshchestva neitrofil'nykh zhelezookislyayushchikh mikroorganizmov zhelezistykh istochnikov razlichnogo genezisa i ikh uchastie v fraktsionirovanii stabil'nykh izotopov zheleza [Communities of neutrophilic iron-oxidizing microorganisms of ferruginous sources of various genesis and their participation in the fractionation of stable iron isotopes]. *Mikrobiol.* [Microbiol.]. 2012. Vol. 81, no. 1. P. 96–104.

*Elokhina S. N., Ryzhenko B. N.* Vtorichnoe mineraloobrazovanie v prirodno-tekhnogennykh gidrogeologicheskikh sistemakh kolchedannykh mestorozhdenii. Modelirovanie obrazovaniya fazy (Fe, Mg) SO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O pri okislenii sul'fidov degtyarskogo medno\_kolchedannogo mestorozhdeniya [Secondary mineral formation in natural and technogenic hydrogeological systems of pyrite deposits. Modeling the formation of the (Fe, Mg) SO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O phase during the oxidation of sulfides of the Degtyarsk copper-pyrite deposit]. *Geokhim.* [Geochem.]. 2014. No. 2. P. 178–192. doi: 10.7868/S0016752514020058

*Filippov M. M.* Shungitonosnye porody Onezhskoi struktury [Shungite-bearing rocks of the Onega structure]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2002. 277 p.

*Filippov M. M., Deines Yu. E.* Subplastovyi tip mestorozhdenii shungitov Karelii [Sublayer type of shungite deposits in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. 261 p.

*Filimonova L. V., Klimanov V. A.* Izmenenie kolichestvennykh pokazatelei paleoklimata v srednetaezhnoi podzone Karelii za poslednie 11000 let [Changes in the quantitative indicators of paleoclimate in the middle taiga subzone of Karelia over the past 11,000 years]. *Bioraznoobrazie, dinamika i resursy bolotnykh ekosistem Vostochnoi Fennoskandii. Trudy KarNTs RAN* [Biodiversity, dynamics, and resources of wetland ecosystems in Eastern Fennoscandia. Trans. KarRC RAS]. 2005. Iss. 8. P. 112–120.

*Ivanov V. V., Nevraev G. A.* Klassifikatsiya podzemnykh mineral'nykh vod [Classification of mineral groundwater]. Moscow: Nedra, 1964. 168 p.

*Ivanov O. P.* Osnovnye faktory razvitiya zon okisleniya sul'fidnykh mestorozhdenii v usloviyakh mnogoletnei merzloty [Main factors of oxidation zones development of sulfide deposits in permafrost conditions]. *Geokhim.* [Geochem.]. 1966. No. 9. P. 1095–1106.

*Ieshina A. V., Polenov I. K., Bogachev M. A., Terukov V. S., Loginova L. F., Perskaya E. A., Borodulina G. S.* Resursy i geokhimiya podzemnykh vod Karelii [Resources and geochemistry of groundwater in Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1987. 151 p.

*Kevlich V. I., Galdobina L. P., Kukushkina P. I., Troshkova R. A.* O kristallomorfologii pirita v shungitakh mestorozhdeniya Maksovo [On crystallography of pyrite in shungites of the Maksovo deposit]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Useful Minerals of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 86–88.

*Kompanchenko A. A., Voloshin A. V., Sidorov M. Yu.* Mineraly Fe v zone okisleniya kolchedannykh rud Yuzhno-Pechengskoi strukturalnoi zony, Kol'skii region: identifikatsiya metodom ramanovskoi spektroskopii [Minerals of Fe in the oxidation zone of massive sulfide ore in the South Pechenga structure zone, Kola region: Identification by the Raman spectroscopy]. *Vestnik MGTU* [Vestnik MSTU]. 2017. Vol. 20, no. 1/1. P. 95–103. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-95-103

*Kulakova N. E., Lozovik P. A.* Analiz vliyaniya Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata na okruzhayushchuyu sredu s uchetom prirodno-tekhnogennykh faktorov formirovaniya i transformatsii vod [Analysis of the impact of the Kostomuksha mining and processing plant on the environment, taking into account the natural and man-induced factors of the formation and transformation of waters]. *Voda: khim. i ekol.* [Water: Chem. and Ecol.]. 2012. No. 2. P. 18–25.

*Kulikova V. V., Kulikov V. S.* Framboidy pirita i drugikh mineralov v shungitakh Onezhskoi struktury [Frambooids of pyrite and other minerals in shungites of the Onega structure]. *Geol. i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona: Trudy IX Vseros. (s mezhdunarod. uchastiem) Fersmanovskoi nauch. sessii, posvyashch. 60-let. GI KRC RAS* [Geol. and strategic minerals of the Kola Region: Proceed. IX All-Russ. (with int. part.) Fersman sci. session, dedicated. 60<sup>th</sup> anniv. IG KSC RAS]. Apatity, 2012. P. 274–279.

Kulikov G. V., Zhevlakov A. V., Bondarenko S. S. Mineral'nye lechebnye vody SSSR. Spravochnik [Medicinal mineral water in the USSR: a reference book]. Moscow: Nedra, 1991. 399 p.

Lebedev A. N., Ivanov V. V., Rengarten E. V., Slavyanov N. N., Vishnevskii S. A. Lechebnye mestnosti Karelii [Healing areas in Karelia]. Eds. prof. M. D. Tushinskii, Dr. A. N. Lebedev. Petrozavodsk: Izd. Narkomzdrava AKSSR, 1935. 188 p.

Lukin A. E. O proiskhozhdenii shungitov [On the origin of shungite]. *Geol. zhurn.* [Geol. J.]. 2005. No. 4. P. 28–47.

Onezhskaya paleoproterozoiskaya struktura [One-ga Paleoproterozoic structure]. Eds. L. V. Glushanin, N. V. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 431 p.

Ptitsyn A. B. Geokhimicheskie osnovy geotekhnologii metallov v usloviyakh merzloty [Geochemical foundations of metals geotechnology in permafrost conditions]. Novosibirsk: Nauka, 1992. 120 p.

Ptitsyn A. B., Sysoeva E. I. Kriogennyi mekhanizm obrazovaniya zony okisleniya Udokana [Cryogenic mechanism of formation of the Udokan oxidation zone]. *Geol. i geofizika* [Geol. Geophysics]. 1995. No. 3. P. 90–97.

Rozhkova V. S., Kovalevskiy V. V., Kochneva I. V., Lozovik P. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya shungitovykh porod Karelii v vodopodgotovke [About the possibility of application of Karelian shungite rocks of in water conditioning]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2012. No. 5. P. 64–67.

Shvartsev S. L., Ryzhenko B. N., Alekseev V. A., Dutova E. M., Kondrat'eva I. A., Kopylova Yu. G., Lepokurova O. E. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda – poroda [Geological evolution and self-organization of the water-rock system]. Vol. 2. Sistema voda – poroda v usloviyakh zony gipergeneza [The water-rock system in the conditions of the hypergenesis zone]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2007. 389 p.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhailova A. I., Rybnikova Z. P., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Kolodei V. S., Ekhova M. V. Pretsizionnyi (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 rock and mineral composition: the method and accuracy estimation in the case study of Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Blazhennikova I. V., Avramenko I. A. Usloviya formirovaniya zhelezistykh mineral'nykh vod po izotopno-geokhimicheskim dannym (kurort "Martsial'nye vody", Kareliya) [Conditions for the formation of ferruginous mineral waters according to isotope-geochemical data (Martsialnye Vody resort, Karelia)]. *Geokhim.* [Geochem.]. 2015. No. 1. P. 88–91. doi: 10.7868/S0016752514110090

Yurgenson G. A. Zona okisleniya v mnogoletnemerzlykh porodakh [Oxidation zone in permafrost]. *Zapiski VMO* [Proceed. RMS]. 1997. Pt. 126. No. 5. P. 15–27.

Yurgenson G. A. Kriomineralogenez v tekhnogenykh massivakh [Cryomineralogenesis in technogenic massifs]. *Mineral. tekhnogeneza-2009* [Mineral. of technogenesis-2009]. Miass: Imin UrO RAN, 2009. P. 61–75.

Alpers C. N., Jambor J. L., Nordstrom D. K. (eds). Sulfate minerals: crystallography, geochemistry, and environmental significance. Reviews in mineralogy and geochemistry. 2000. Vol. 40. 608 p.

Blodau C., Gatzek C. Chemical controls on iron reduction in schwertmannite-rich sediments. *Chem. Geol.* 2006. Vol. 235, iss. 3–4. P. 366–376. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.08.003

Butler I. B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 2000. Vol. 64, iss. 15. P. 2665–2672. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00387-2

Dold B., Fontboté L. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy and mineral processing. *J. Geochem. Explor.* 2001. Vol. 74. P. 3–55. doi: 10.1016/S0375-6742(01)00174-1

Evangelou V. P. Pyrite chemistry: the key for abatement of acid mine drainage. *Acidic mining lakes: acid mine drainage, limnology and reclamation.* Heidelberg: Springer, 1998. P. 197–222. doi: 10.1007/978-3-642-71954-7\_10

Elberling B., Schippers A., Sand W. Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures. *J. Contam. Hydrol.* 2000. No. 41. P. 225–238. doi: 10.1016/S0169-7722(99)00085-6

Jambor J. L., Blowes D. W., Ptacek C. J. Mineralogy of mine wastes and strategies for remediation. *Environ. Mineral. EMU Notes in Mineralogy.* 2000. P. 255–290.

Kleinmann R. L. P., Crerar D. A., Pacelli R. R. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Eng.* 1981. No. 33. P. 300–303.

Knorr K., Blodau C. Controls on schwertmannite transformation rates and products. *Appl. Geochem.* 2007. Vol. 22, iss. 9. P. 2006–2015. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.04.017

Lottermoser B. G. Environmental indicators in metal mining. Springer Int. Publ., 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42731-7

Lottermoser B. G. Mine wastes characterization, treatment and environmental impacts. Third edition. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12419-8

Nordstrom D. K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid Sulfate Weathering.* Madison. WI. Soil Sci. Society of America, 1982. P. 37–56.

Nordstrom D. K., Alpers C. N. Geochemistry of acid mine waters. *The Environ. Geochem. of Mineral Deposits. Part A. Processes, methods and health issues.* Rev. Economic Geologists. 1999. P. 133–160. doi: 10.5382/Rev.06.06

Rimstidt J. D., Vaughan D. J. Pyrite oxidation: A state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 2003. Vol. 67, iss. 5. P. 873–880. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01165-1

Rose A. W., Cravotta C. A. Geochemistry of coal mine drainage. *Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania. The Pennsylvania Dep. Environ. Protection*. Pittsburgh, 1998. Ch. 1. P. 1–22.

Rust G. W. Colloidal primary copper ores at Cornwall Mines, Missouri. *J. Geol.* 1935. Vol. 43. P. 398–426.

Svetov S. A., Chazhengina S. Yu., Stepanova A. V. Geochemistry and texture of clinopyroxene phenocrysts from Paleoproterozoic picrobasalts, Onega Basin, Fennoscandian Shield: records of magma mixing processes.

*Minerals*. 2020. Vol. 10(5), 434. doi: 10.3390/min10050434

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic – White Searegion in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ). *Quaternary Int.* 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

Received May 26, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Бородулина Галина Сергеевна**

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

### **Светов Сергей Анатольевич**

директор, д. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ssvetov@krc.karelia.ru

### **Токарев Игорь Владимирович**

ведущий специалист, к. г.-м. н.  
РЦ РДМИ Научный парк Санкт-Петербургского  
государственного университета  
пер. Декабристов, 16, Санкт-Петербург, Россия, 199155  
эл. почта: i.tokarev@spbu.ru

### **Левичев Михаил Александрович**

главный геолог 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: mikhail-levichev@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Borodulina, Galina**

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

### **Svetov, Sergey**

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

### **Tokarev, Igor**

Research Centre for X-ray Diffraction Studies,  
St. Petersburg State University Research Park  
16 Dekabristov St., 199155 St. Petersburg, Russia  
e-mail: i.tokarev@spbu.ru

### **Levichev, Mikhail**

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

## ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.58 + 579.68

### ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г. Г. Митрукова<sup>1</sup>, Л. Л. Капустина<sup>1,2</sup>, Е. А. Курашов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН), Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), Россия

По результатам микробиологических наблюдений летом 2006, 2010, 2014 и 2019 гг. дана характеристика эколого-санитарного состояния литоральной зоны по всему периметру Ладожского озера. Общая численность бактериопланктона (ОЧБ) на различных участках литорали колебалась от 1, 10 млн кл/мл (2006 г., пос. Ляскеля и около о. Койонсаари) до 15,90 млн кл/мл (2014 г., выход из зал. Импилахти). По медианам за период наблюдений величинам ОЧБ трофический статус большей части исследованной акватории был типично мезотрофным. Участки литорали на выходе из залива Импилахти; у г. Питкяранты в проливе напротив целлюлозного завода (ЦЗ) и около дер. Вороново имели мезотрофно-эвтрофный статус. Количество палочковидных форм бактерий колебалось от 30 % около пос. Ляскеля и в зал. Хауккалаhti летом 2014 г. до максимальной величины (73 %) на акватории, подверженной антропогенному влиянию, около пос. Назия летом 2010 г. Обнаружена положительная корреляция между ОЧБ и температурой воды. Развитие бактериопланктона в литоральной зоне статистически достоверно было более интенсивным в «теплые» годы (2010, 2014) по сравнению с более «холодными» (2006, 2019). На основании соотношений численности сапрофитных бактерий и ОЧБ в 2019 г. водные массы исследованной акватории относились к условным категориям «чистые» и «особо чистые». Основными зонами экологического риска являлись: литораль п-ова Рауталаhti; литоральная зона у г. Питкяранты в проливе напротив ЦЗ; Приозерск, устье р. Вуоксы; Щучий залив; мыс Осиновец; Тайполовский залив; акватории вблизи поселков Назия и им. Морозова.

**Ключевые слова:** общая численность бактериопланктона; морфотипы бактерий; трофический статус; сапрофитные микроорганизмы; колиформные бактерии; качество воды.

**G. G. Mitrukova, L. L. Kapustina, E. A. Kurashov. ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF WATER QUALITY OF THE LITTORAL ZONE OF LAKE LADOGA BASED ON THE RESULTS OF MICROBIOLOGICAL STUDIES**

The ecological and sanitary state of the littoral zone of Lake Ladoga is described according to the data from microbiological observations in 2006, 2010, 2014, and 2019. The total bacterial numbers (TBN) in different parts of the littoral zone varied from 1.10 million cells/ml (2006, Lyaskelya Village and Koionsaari Island) to 15.90 million cells/ml (2014, entrance to Impilahti Bay). It is shown that based on the average total bacterial numbers during the observation period the trophic status of most of the studied water area was typically mesotrophic. Some parts of the littoral have a mesotrophic-eutrophic status: entrance to Impilahti Bay; the area near Pitkyaranta in the channel opposite to the pulp and paper mill (northern region), and near the Voronovo Village (southern region). Correlation analysis revealed a positive relationship between TBN and water temperature. The development of bacterioplankton in the littoral zone was more intensive in the "warm years" (2010, 2014) compared to the "colder" ones (2006, 2019). The content of rod-shaped bacteria ranged from 30 % in the water area near the Lyaskelya Village and in Haukkalahti Bay in summer 2014 up to 73 % near Nazia Village in summer 2010. Based on the average quantitative ratios of saprophytic bacteria and TBN in 2019, the water masses in all the littoral areas were conventionally classified as "clean" and "very clean". The main environmental risk spots, where a relatively high number of saprophytes and a growth of total coliform bacteria were detected (even if in small quantities), were the littoral part of the Rautalahti Peninsula; littoral zone near Pitkyaranta; water area near Priozersk, the mouth of the River Vuoksa; Shchuchiy Bay; waters at Cape Osinovets; Taipolovsky Bay; water areas near Nazia Village and the village Imeni Morozova.

**Key words:** bacterioplankton abundance; morphotypes of bacteria; trophic status; saprophytic bacteria; coliform bacteria; water quality.

## **Введение**

Озерная литораль является переходной зоной между наземной и водной экосистемами, это место смешения водных масс различного происхождения и интенсивного протекания химических и биологических процессов [Распопов и др., 1998; Распопов, 2009; Курашов и др., 2011]. Относительная доля литоральной зоны в крупных глубоких водоемах значительно меньше, чем в небольших и мелководных, что справедливо и для самого большого внутреннего водоема Европы – Ладожского озера, где эта зона составляет лишь 15 % площади озера (2543,0 км<sup>2</sup>) и 1,3 % объема воды (9,67 км<sup>3</sup>) [Науменко, 2013]. Однако в связи с огромными размерами водоема прибрежная зона имеет большую протяженность, длина береговой линии озера без учета длины берегов островов составляет 1570 км [Распопов, 2009; Науменко, 2013] и характеризуется наибольшими биоразнообразием и биопродуктивностью.

До сих пор литоральная зона Ладожского озера остается недостаточно изученной, несмотря на важное природоохранное, социально-экономическое и рекреационное значение. Это особая зона, которая первой принимает с водосборной площади аллохтонные соеди-

нения различной природы, в том числе загрязняющие вещества, и выполняет роль своеобразного экологического барьера между водосбором и основной акваторией озера [Дзюбан и др., 2007; Курашов и др., 2011]. Поэтому первостепенную роль здесь играют организмы, активно участвующие в процессах естественного самоочищения вод, в частности, микроорганизмы, за счет деструкционной деятельности которых происходит трансформация большей части энергии, поступающей в водные экосистемы с автохтонным и аллохтонным органическим веществом [Кузнецов, 1970; Wetzel, 1982; Копылов, Косолапов, 2008]. Первые подробные микробиологические исследования литорали по всему периметру Ладожского озера были проведены только летом 2006 г. [Капустина, 2011]. До этого времени микробиологические исследования прибрежной зоны Ладожского озера ограничивались Волховской губой, бухтой Петрокрепость, Щучим заливом, подверженным влиянию стоков деревообрабатывающих производств г. Приозерска, и незначительным количеством станций в районе восточного берега и в шхерном районе [Родина, Кузьмицкая, 1963].

Благодаря способности бактерий быстрее других гидробионтов реагировать на малей-

шие изменения физико-химических условий в водоеме это сообщество является надежным индикатором качества вод. При благоприятных условиях (например, при повышении концентрации легкоокисляемого органического вещества в воде или при повышении температуры воды) численность микроорганизмов быстро увеличивается, усиливается интенсивность их обмена. Кроме того, общая численность бактериопланктона (ОЧБ) в воде является показателем трофического статуса водоемов [Романенко, 1979; Bouillon, Hakanson, 2003; Копылов, Косолапов, 2007]. Соотношение количества сапрофитных бактерий и общего количества бактерий характеризует качество вод [Романенко, 1979], а наличие в воде общих (ОКБ) и термотолерантных (ТКБ) колиформных бактерий свидетельствует о фекальном загрязнении [МУК..., 2004]. Поэтому микробиологические показатели обязательно должны входить в систему комплексного мониторинга.

Настоящая работа посвящена изучению количественного развития бактериопланктона в литоральной зоне Ладожского озера в современный период, оценке современного трофического статуса и санитарного состояния этой зоны, а также выявлению тенденций изменения качества воды прибрежной зоны озера по микробиологическим показателям за последние 14 лет.

## Материалы и методы

Водосбор Ладожского озера находится в подзонах южной и средней тайги. Районирование литоральной зоны водоема проводилось по физико-географическим особенностям различных частей озера [Черняева, 1966, цит. по: Ладожское..., 2015]. Выделены северный (шхерный), западный, восточный и южный районы. Отбор микробиологических проб производился из поверхностного горизонта воды на станциях, расположенных по всему периметру Ладожского озера (рис.), в конце июля – начале августа 2006, 2010, 2014 и 2019 гг. Глубины всех исследованных станций варьировали в пределах 0,5–1,0 м. Летом 2011 и 2017 гг. дополнительно производился отбор проб на литорали Волховской губы и вблизи пос. им. Морозова (бухта Петрокрепость) соответственно. Определение общей численности бактериопланктона, как показателя качества воды и количественного соотношения палочковидных и кокковидных форм микроорганизмов, в качестве косвенного показателя антропогенного воздействия на водоем [Кожова, Дутова, 1989; Киреева, 2007] производили в течение

всего периода исследований. Для определения концентрации микроорганизмов в воде пробы фиксировались 40% формалином до конечной концентрации 2%. Количество бактериальных клеток подсчитывали под люминесцентными микроскопами ЛЮМАМ И-3 (2006, 2010 гг.) и МИКМЕД-26 (2014, 2019 гг.) при увеличении  $\times 1100$  на черных нуклеопоровых фильтрах (диаметр пор 0,20 мкм) с использованием флуорохрома акридина оранжевого [Hobbie et al., 1977; Кузнецов, Дубинина, 1989]. Трофический статус различных районов литоральной зоны оценивался в соответствии с классификацией водоемов по общей численности бактериопланктона [Копылов, Косолапов, 2007].

В 2019 г. дополнительно определялась численность сапрофитных микроорганизмов методом глубинного посева на питательную среду ГРМ-агар [Кузнецов, Дубинина, 1989] и рассчитывалось соотношение количества сапрофитных бактерий и общего количества бактерий, которое обычно колеблется в водоемах в пределах от 0,0003 до 3 (редко более) [Романенко, 1979; Руководство..., 1982].

В 2019 г. также определяли численность общих колиформных бактерий и термотолерантных колиформных бактерий, свидетельствующих о наличии хозяйственно-бытового, и в том числе фекального, загрязнения методом мембранной фильтрации [МУК..., 2004]. Особенно важно отслеживать подобное загрязнение акваторий, использующихся для рекреации, таких как литоральная зона водоемов. Поэтому все участки литорали, где обнаруживался рост ОКБ, даже в концентрациях, не превышающих установленный для зон рекреации норматив (500 КОЕ/100 мл) [СанПиН..., 2001], считались испытывающими антропогенное воздействие.

Полученные результаты обрабатывали методами математической статистики с использованием программы Statistica 10. Связь между параметрами (ОЧБ и температура воды за весь период исследований) выявлялась с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена. Оценка достоверности различий между значениями параметров проводилась по критерию Манна – Уитни.

## Результаты и обсуждение

Общая численность бактериопланктона на различных участках литорали Ладожского озера в 2006 году колебалась от 1,10 млн кл/мл на акватории около пос. Ляскеля (ст. 15, северный район) и напротив о. Койонсаари (ст. 22) до 5,00 млн кл/мл в Тайполовском заливе (ст. 27, западный район). В 2010 г. концентрация бак-



Схема расположения станций в литоральной зоне Ладожского озера (картографические данные Яндекс, 2020)

Scheme of the stations in the littoral zone of Lake Ladoga (map data by Yandex, 2020)

терий изменялась от 2,20 млн кл/мл в истоке р. Невы до 7,00 млн кл/мл на акватории около дер. Вороново (южный район). Максимальная за весь период исследований величина ОЧБ зарегистрирована в 2014 г. (15,90 млн кл/мл) в северной части озера на выходе из залива Импилахти (ст. 12), минимальное количество бактериопланктона отмечено в этом же году в бухте Владимирской (ст. 26, западный район) – 1,40 млн кл/мл. В 2019 г. минимальные и максимальные значения ОЧБ составляли соответственно 1,36 млн кл/мл (Андрусовская бухта, ст. 7) и 4,38 млн кл/мл в Якимварском заливе, пос. Соролы (ст. 21b) (табл. 1–4).

На большинстве станций величины численности микроорганизмов в 2010 и 2014 гг. были близки между собой и превышали аналогичные величины, обнаруженные в 2006 и 2019 гг., в 1,5–6 раз. Вероятно, относительно высокая общая численность бактерий почти на всех станциях в 2010 и 2014 гг. связана с более высокими температурами воды в эти годы по сравнению с 2006 и 2019 годами. Медианы ОЧБ по всем станциям в 2006 и 2019 гг. – 1,72 и 2,6 млн кл/мл соответственно. Медианы температуры воды за те же годы были 18,2 и 18,0 °С соответственно. В 2010 и 2014 гг. медианы ОЧБ по всем станциям составляли 4,7

и 4,1 млн кл/мл соответственно. Медианные значения температуры воды за эти годы равнялись 24,3 и 23,5 °С соответственно. Критерий Манна – Уитни выявил достоверные различия количества бактериопланктона в «холодные» и «теплые» годы ( $U_{\text{эмп}} = 220,5$ ;  $n_1 = 27$ ;  $n_2 = 56$ ;  $p < 0,05$ ). Коэффициент Спирмена выявил наличие положительной связи между ОЧБ и температурой воды ( $r = 0,59$ ;  $n = 83$ ;  $p < 0,05$ ).

В северном районе минимальная за годы исследований величина ОЧБ отмечалась на участке литорали около пос. Ляскеля (ст. 15) в 2006 г., а максимальная – на станции у выхода из залива Импилахти (ст. 12) в 2014 г. (табл. 1). На выходе из зал. Импилахти также отмечался максимальный по сравнению с другими участками процент палочковидных клеток (57 %). Здесь встречались палочки длиной до 30–40 мкм и толщиной до 1 мкм, тогда как обычно длина таких клеток в Ладожском озере составляет 2–3 мкм [Капус-

тина, 2013]. Средний процент палочковидных форм бактерий в северном районе озера был равен  $45,9 \pm 9,6$  %. Очень высокая численность микроорганизмов, обнаруженная на выходе из зал. Импилахти и характерная для грязных вод, вряд ли объясняется только относительно высокими температурами воды в 2014 г., тем более что на этой же станции отмечался максимальный процент палочковидных клеток, часто больших размеров, что косвенно подтверждает наличие в воде значительного количества органического вещества [Кожова, Дутова, 1989; Киреева, 2007; Копылов, Косолапов, 2008]. По всей видимости, залив загрязняется в связи с хозяйственной деятельностью на его акватории. В настоящее время в пос. Импилахти функционирует лесопильное предприятие «Сетлес» [Правительство...]. Возможно, отходы производства и муниципальные стоки поселка эпизодически могут поступать в воду залива.

Таблица 1. Общая численность бактериопланктона ( $N_{\text{bac}}$ , млн кл/мл), численность сапрофитных бактерий ( $N_{\text{sb}}$ , КОЕ\*/мл) и общих колиформных бактерий ( $N_{\text{cb}}$ , КОЕ/100 мл) в северном (шхерном) районе Ладожского озера летом 2006, 2014 и 2019 гг.

Table 1. The total bacteria numbers ( $N_{\text{bac}}$ , million cells/ml), the number of saprophytic bacteria ( $N_{\text{sb}}$ , CFU\*/ml) and total coliform bacteria ( $N_{\text{cb}}$ , CFU/100 ml) in the northern region (skerries) of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2014 and 2019

№ станции Station No.	Местоположение Location	$N_{\text{bac}}$			$N_{\text{sb}}$	$N_{\text{cb}}$
		2006 г.	2014 г.	2019 г.	2019 г.	2019 г.
10	У г. Питкяранта, в проливе напротив завода City of Pitkyaranta (near pulp and paper mill)	2,80	6,60	2,44	1000	46
12	Выход из зал. Импилахти Entrance of Impilahti Bay	2,60	15,9	2,84	128	не обнаружено not detected
13	Зал. Хауккалаhti Haukkalahti Bay	1,72	4,50	1,83	118	не обнаружено not detected
15	Около пос. Ляскеля Near the Lyaskela Village	1,10	3,20	3,76	38	не обнаружено not detected
16	Мыс Умоппиуми Cape Umoppiumi	-	4,10	2,88	34	не обнаружено not detected
17	Зал. у п-ова Рауталаhti Rautalahti Bay	1,32	6,30	1,65	440	5
20	Западный берег о. Путсаари West coast of the Putsaari Island	1,52	3,10	3,85	184	не обнаружено not detected
21	Якимварский зал., пос. Сорола Yakkimvar Bay, Sorola Village	1,63	3,10	4,11	122	не обнаружено not detected
21b	Якимварский зал., пос. Сорола Yakkimvar Bay, Sorola Village	-	-	4,38	100	не обнаружено not detected
C1-19	Сортавальские шхеры Sortavala skerries	-	-	1,44	204	не обнаружено not detected

Примечание. Здесь и далее: «-» – исследование не проводилось; \*КОЕ – колониеобразующая единица, т. е. отдельная колония микроорганизмов, вырастающая на твердой питательной среде.

Note. «-» – the study was not carried out; \*CFU – colony forming unit, i. e. a separate colony of microorganisms growing on a solid nutrient medium.

Таблица 2. Общая численность бактериопланктона ( $N_{bac}$ , млн кл/мл), численность сапрофитных бактерий ( $N_{sb}$ , КОЕ/мл) и общих колиформных бактерий ( $N_{cb}$ , КОЕ/100 мл) в западном районе Ладожского озера летом 2006, 2014 и 2019 гг.

Table 2. The total bacteria numbers ( $N_{bac}$ , million cells/ml), the number of saprophytic bacteria ( $N_{sb}$ , CFU/ml) and total coliform bacteria ( $N_{cb}$ , CFU/100 ml) in the western region of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2014 and 2019

№ станции Station No.	Местоположение Location	$N_{bac}$			$N_{sb}$	$N_{cb}$
		2006 г.	2014 г.	2019 г.	2019 г.	2019 г.
22	Напротив о. Койонсаари Koionsaari Islands	1,10	2,6	1,51	128	не обнаружено not detected
22b	Напротив о. Койонсаари Koionsaari Islands	-	-	2,53	38	не обнаружено not detected
23	Приозерск; устье р. Вуоксы, зал. у завода Mouth of the Vuoksa River	1,20	6,00	2,94	632	36
26	Бухта Владимирская Vladimir Bay	1,35	1,40	1,69	576	не обнаружено not detected
27	Тайполовский залив Taipolovsky Bay	5,00	-	3,27	250	27
28	Бухта Далёкая Dalyokaya Bay	4,50	3,00	2,43	162	5
Щучий залив Shchuchiy Bay	Ст. 1 (дамба) Dam	1,70	-	3,17	784	36
	Ст. 2 (центр) Center	-	-	2,53	690	9
	Ст. 3 (выход) Entrance	1,90	-	2,35	402	18
	Ст. 4 (литораль) Littoral	-	-	2,65	1136	не обнаружено not detected

На остальных станциях концентрация микроорганизмов колебалась в довольно широких пределах с максимальными величинами на большинстве из них в 2014 г. (табл. 1). Медиана ОЧБ для литорали данного района за годы исследований составляла 2,88 млн кл/мл. На некоторых прибрежных участках северного района за последние 14 лет (2006–2019 гг.) произошло повышение количества микроорганизмов. Так, на станциях 15 (около пос. Ляскеля), 20 (западный берег о. Путсаари) и 21 (Якимварский зал., пос. Соролла) за этот период ОЧБ увеличилась в 2,5–3,4 раза (табл. 1). Возможно, это результат антропогенного эвтрофирования вод вследствие близости поселков и все более активного посещения туристами о. Путсаари. На станциях, где за период исследований концентрация микроорганизмов увеличилась, максимальные величины ОЧБ наблюдались не в 2014 г., как на остальных участках литорали, а в 2019 г., т. е. происходило непрерывное повышение уровня количественного развития бактериопланктона, уровень трофии водных масс изменялся от олиготрофно-мезотрофного до мезотрофно-эвтрофного [Копылов, Косолапов, 2007].

На основе медианных значений ОЧБ за период исследований трофический статус водных масс литоральной зоны северной части

озера в целом можно считать мезотрофным за некоторыми исключениями. В 2014 г. трофический уровень вод на участках литорали вблизи г. Питкяранта и в заливе у п-ова Рауталаhti соответствовал эвтрофному, а на выходе из зал. Импилахти – гиперэвтрофному. По данным 2019 г., водные массы у г. Питкяранты и на выходе из зал. Импилахти характеризовались как мезотрофно-эвтрофные, а в районе Сортавальских шхер – как слабomezотрофные [Копылов, Косолапов, 2007].

По величинам соотношений численности сапрофитов и ОЧБ водные массы литорали шхерного района относились к условным категориям «чистые» и «особо чистые» (табл. 5). В северном литоральном районе повышенной численностью сапрофитов отличались две станции: у г. Питкяранты напротив целлюлозного завода (ЦЗ) (ст. 10) и в заливе у п-ова Рауталаhti (ст. 17) (табл. 1). На этих же станциях зафиксирован незначительный рост ОКБ – 46 и 5 КОЕ/100 мл соответственно, что значительно ниже пределов, установленных для водоемов, используемых для зон рекреации (500 КОЕ/100 мл) [СанПиН..., 2001]. По-видимому, на акваторию вблизи г. Питкяранты (ст. 10) могут попадать сбросы Питкярантского ЦЗ и, возможно, городские муници-

Таблица 3. Общая численность бактериопланктона ( $N_{bac}$ , млн кл/мл), численность сапрофитных бактерий ( $N_{sb}$ , КОЕ/мл) и общих колиформных бактерий ( $N_{cb}$ , КОЕ/100 мл) в южном районе Ладожского озера летом 2006, 2010, 2014 и 2019 гг.

Table 3. The total bacteria numbers ( $N_{bac}$ , million cells/ml), the number of saprophytic bacteria ( $N_{sb}$ , CFU/ml) and total coliform bacteria ( $N_{cb}$ , CFU/100 ml) in the southern region of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2010, 2014 and 2019

№ станции Station No.	Местоположение Location	$N_{bac}$				$N_{sb}$	$N_{cb}$
		2006 г.	2010 г.	2014 г.	2019 г.	2019 г.	2019 г.
30	Мыс Осиновец Cape Osinovets	3,10	-	3,40	3,25	1968	спл. рост Sol. gr.
2 (в 2019 г. – Lst-2-19)	Дер. Кобона, налево от выхода из канала Cobona Village, left of the canal entrance	2,35	3,40	4,30	1,84	63	не обнаружено not detected
5	200 м налево от выхода в Ладогу из канала от дер. Вороново Voronovo Village	1,70	7,00	6,90	3,13	392	не обнаружено not detected
31-19	Пос. им. Морозова Village n. a. Morozov	-	-	-	2,85	398	20
	Севернее пос. им. Морозова Village n. a. Morozov	-	5,20	-	-	-	-
L3-14	Пос. Назия Nazia Village	-	4,00	-	2,09	288	30
	Не доходя пос. Назия Nazia Village	-	5,70	-	-	-	-
H 1	Исток р. Невы Springhead of the Neva River	-	2,20	-	-	-	-
L4-14	Выход из р. Волхов в Ладогу Entrance from Volkhov River to Ladoga	-	-	-	2,93	432	40
L1-19	Пос. Заостровье Zaostrovye Village	-	-	-	3,14	672	не обнаружено not detected
L10-14	4 км левее устья р. Волхов Near mouth of the Volkhov River	-	4,70	-	3,22	74	не обнаружено not detected
L9-14	2 км налево от устья р. Волхов Near mouth of the Volkhov River	2,90	2,40	-	2,80	632	не обнаружено not detected
Lst-5b-09	Устье р. Волхов Mouth of the Volkhov River	-	-	-	1,87	440	не обнаружено not detected

Примечание. «Спл. рост» – сплошной рост микроорганизмов на фильтре.

Note. «Sol. gr.» – solid growth of microorganisms on the filter.

пальные стоки. На ст. 17 (зал. у п-ова Рауталаhti) не исключено попадание муниципальных стоков от пос. Рауталаhti, т. к. отбор проб производился в вершине залива недалеко от поселка. Минимальные величины численности сапрофитных бактерий отмечались на станциях у пос. Ляскеля и у мыса Умоппиуми. На участке литорали у пос. Ляскеля низкая численность данных микроорганизмов, по-видимому, связана с прекращением работы бумажной фабрики, длительное время существовавшей в поселке. Ранее (конец 80-х годов прошлого столетия) в прибрежье у поселка отмечался интенсивный рост этой группы микроорганизмов (Л. Л. Капустина, неопубликованные дан-

ные). Последние несколько лет фабрика не работает, и в настоящее время экологическое состояние указанного участка, судя по нашим данным, улучшилось. На большинстве станций этого района рост ОКБ не зафиксирован, что свидетельствует об отсутствии фекального загрязнения.

В литоральной зоне западной части озера концентрация бактерий за исследованный период на большинстве станций колебалась в довольно узких пределах – 1,1–2,4 раза (табл. 2). Медиана ОЧБ литорали западного берега Ладоги за 2006, 2014 и 2019 гг. составляла 2,53 млн кл/мл. Наиболее значительные колебания (1,20–6,00 млн кл/мл) отмеча-

Таблица 4. Общая численность бактериопланктона ( $N_{bac}$ , млн кл/мл), численность сапрофитных бактерий ( $N_{sb}$ , КОЕ/мл) и общих колиформных бактерий ( $N_{cb}$ , КОЕ/100 мл) в восточном районе Ладожского озера летом 2006, 2010, 2014 и 2019 гг.

Table 4. The total bacteria numbers ( $N_{bac}$ , million cells/ml), the number of saprophytic bacteria ( $N_{sb}$ , CFU/ml) and total coliform bacteria ( $N_{cb}$ , CFU/100 ml) in the eastern region of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2010, 2014 and 2019

№ станции Station No.	Местоположение Location	$N_{bac}$				$N_{sb}$	$N_{cb}$
		2006 г.	2010 г.	2014 г.	2019 г.	2019 г.	2019 г.
6 (в 2019 г. – L16-10)	Свирская губа (устье р. Свирь) Mouth of the Svir River	2,50	4,70	4,70	1,56	46	15
7	Андрусовская бухта Andrus Bay	2,10	-	3,20	1,36	44	не обнаружено not detected
8	У о. Мантсинсаари Mantsinsaari Island	1,40	-	4,10	2,83	38	не обнаружено not detected
8гх	Открытый восточный берег Свирской губы, литораль East coast of Svir Bay	-	-	-	1,37	415	не обнаружено not detected
9	Зал. Ууксунлахти Uksunlahti Bay	-	-	-	2,37	86	не обнаружено not detected

лись на станции вблизи г. Приозерска в устье р. Вуоксы, у завода древесно-волоконных плит. Здесь наибольшая численность бактериопланктона регистрировалась в 2014 г. при максимальной температуре воды (25,8 °С). На различных участках литорали западного района максимальные и минимальные величины численности микроорганизмов, как правило, отмечались в разные годы, т. е. каких-либо закономерностей не прослеживалось. Только на двух станциях обнаруживалась тенденция снижения количества микроорганизмов за период исследований. В бухте Далекой (ст. 28), по данным за 2006, 2014 и 2019 гг., ОЧБ постепенно уменьшилось почти в два раза (с 4,50 до 2,43 млн кл/мл). В Тайполовском заливе (ст. 27) с 2006 по 2019 гг. также произошло снижение численности бактерий с 5,00 до 3,27 млн кл/мл. Однако в 2014 г. пробы в нем не отбирались, в связи с чем оценить динамику величин внутри 14-летнего интервала не представляется возможным. В 2006 и 2019 гг. ОЧБ в Щучьем заливе варьировала в пределах 1,70 млн кл/мл (у дамбы в 2006 г.) – 3,17 млн кл/мл (у дамбы в 2019 г.). Анализ многолетних данных [Александрова, Капустина, 1982; Капустина, 2011] показал, что после закрытия Приозерского ЦБК количество бактерий в Щучьем заливе постепенно снизилось с 12,4 млн кл/мл в 1987 г. до среднего значения  $2,38 \pm 0,4$  млн кл/мл в 2006 и 2019 гг. Трофический статус водных масс западной части литорали озера за исследуемый период, судя по медианным величинам численности микроорганизмов, можно охарактеризовать как мезотрофный [Копылов, Косолапов, 2007].

Для западного района получены наибольшие медианные величины соотношения численности сапрофитных бактерий и ОЧБ (табл. 5).

На данной акватории по содержанию сапрофитов выделяются участки, подверженные антропогенному воздействию: устье р. Вуоксы (г. Приозерск), Щучий залив и бухта Владимирская. В устье Вуоксы также регистрировался слабый рост ОКБ. На большинстве станций данного района (включая Щучий залив) количество бактерий группы кишечной палочки было незначительным (5–36 КОЕ/100 мл) и не превышало установленного норматива. Высокая численность сапрофитов, обнаруженная в устье р. Вуоксы, может быть связана с поступлением стоков Приозерского завода древесно-стружечных плит и/или не до конца очищенных муниципальных стоков г. Приозерска, что косвенно подтверждает наличие в воде ОКБ. Значительные численности сапрофитов, выявленные в Щучьем заливе, уменьшаются по мере удаления от дамбы, что, скорее всего, связано с постоянным подтоком загрязненных вод в районе дамбы через искусственно прорытый канал из оз. Дроздово. На берегу Тайполовского залива находятся турбазы [Мир...], кроме того, в залив впадает р. Бурная, что может обуславливать наличие в водных массах литорали бактерий группы кишечной палочки. По величинам соотношений численности сапрофитов и ОЧБ водные массы литоральной зоны западного района относятся к условным категориям «чистые» и «особо чистые» (табл. 5).

В южном прибрежном районе концентрация микроорганизмов в воде литоральной зоны бухты Петрокрепость была несколько ниже, чем в аналогичной зоне Волховской губы. Медианы ОЧБ по всем станциям бухты Петрокрепость и Волховской губы за исследованный период –

Таблица 5. Диапазон изменений и медианные величины соотношения численности сапрофитных бактерий (S) и ОЧБ ( $N_{\text{bac}}$ ) в различных районах литорали Ладожского озера и условные категории качества вод в 2019 г.

Table 5. The range of changes and median of the ratio of the number of saprophytic bacteria (S) and the total bacteria numbers ( $N_{\text{bac}}$ ) in various regions of the littoral of Lake Ladoga and the conventional categories of water quality in 2019

Район Region	S/ $N_{\text{bac}}$	Условная категория качества вод Conventional category of water quality
Северный (шхерный) район Northern region (skerry area)	$\frac{0,005 \pm 0,01}{(0,001-0,041)}$	«чистые» и «особо чистые» 'clean' and 'especially clean'
Западный район Western region	$\frac{0,021 \pm 0,013}{0,002-0,061}$	«чистые» и «особо чистые» 'clean' and 'especially clean'
Южный район Southern region	$\frac{0,014 \pm 0,006}{0,002-0,024}$	«чистые» и «особо чистые» 'clean' and 'especially clean'
Восточный район Eastern region	$\frac{0,003 \pm 0,008}{0,001-0,030}$	«чистые» и «особо чистые» 'clean' and 'especially clean'

3,33 и 4,20 млн кл/мл соответственно (различие статистически недостоверно при  $p < 0,05$ ). Это же справедливо и для открытых районов вышеуказанных бухты и губы за тот же период: 1,87 и 3,15 млн кл/мл соответственно (однако различие статистически достоверно при  $p < 0,05$ ;  $U_{\text{эмп}} = 15$ ;  $n_1 = 8$ ;  $n_2 = 10$ ). В прибрежных водах бухты Петрокрепость и Волховской губы средний за период исследований процент палочковидных клеток в бактериопланктоне был  $58,6 \pm 7,2$  и  $53,6 \pm 7,8$  % соответственно (различие содержания палочек в литорали заливов статистически недостоверно при  $p < 0,05$ ). В южном побережье Волховская губа всегда выделялась повышенным уровнем развития бактериопланктона в связи с поступлением в нее значительного количества взвеси и биогенных элементов с водными массами рек Волхова и Сяси. Кроме того, в устьевом участке р. Сясь обнаруживаются стоки Сясьского ЦБК, которые в летний период при определенных метеоусловиях под влиянием ветровых течений могут распространяться вдоль берега Волховской губы к р. Волхов, существенно увеличивая ОЧБ в литоральной зоне [Александрова, Капустина, 1982; Капустина, 2011]. Тем не менее в устье р. Волхов в 2019 г. (данных литоральных рейсов за предыдущие годы нет) обнаружена достаточно низкая концентрация микроорганизмов (1,87 млн кл/мл), что не совсем обычно с учетом вышеуказанного. Кроме того, ОЧБ в реке выше, чем в Волховской губе, так как Волхов берет начало из более продуктивного, чем Ладога, оз. Ильмень. Скорее всего, во время отбора проб в 2019 г. в устье Волхова наблюдался нагон озерных вод, менее обогащенных микроорганизмами, что происходит при устойчивом ветре северо-западного направления. Стабильностью величин ОЧБ (3,10–3,40 млн кл/мл) за

время исследований выделялся участок литорали у мыса Осиневец. Трофический статус водных масс южного побережья по медианным значениям численности бактериопланктона за исследованный период характеризуется как мезотрофный с чертами эвтрофии [Копылов, Косолапов, 2007]. На участке литорали у дер. Вороново трофический статус вод в 2010 и 2014 гг. соответствовал эвтрофному.

В южном литоральном районе наиболее высокая численность сапрофитов, свидетельствующая о загрязнении значительным количеством органических веществ, наблюдалась вблизи мыса Осиневец (ст. 30) – 1968 КОЕ/мл (табл. 3). Здесь же отмечалось значительное количество палочковидных клеток – 58,3–64,3 % и очень интенсивный рост ОКБ (сплошной рост). Такие концентрации сапрофитов и ОКБ у мыса Осиневец, по всей видимости, связаны с активной застройкой мыса. На нем организована обширная рекреационная зона: база отдыха [Осиновецкий...], протяженный пляж, пользующийся популярностью у жителей Санкт-Петербурга. Учитывая то, что пробы отбирались летом, в разгар туристического сезона, понятна причина высоких величин микробиологических показателей. К тому же отбор проб у мыса Осиневец происходил в условиях сильного ветрового воздействия и, как следствие, взмучивания донных отложений. Относительно повышенные численности сапрофитов регистрировались в Волховской губе у пос. Заостровье и в 2 км налево от устья Волхова. В водах Волховской губы и бухты Петрокрепость были обнаружены небольшие количества ОКБ. Высокие концентрации сапрофитных бактерий и наличие ОКБ в вышеуказанных акваториях могут свидетельствовать о поступлении в них аллохтонной микрофлоры и орга-

нических веществ с терригенным стоком, т. к. на береговой линии южного побережья Ладожского озера находятся довольно крупные населенные пункты: поселки им. Морозова, Назия и Заостровье, дер. Вороново. В Волховскую губу также поступает аллохтонная микрофлора с водами р. Волхов. Тем не менее по величинам соотношений численности сапрофитов и ОЧБ водные массы литоральной зоны южного района относятся к условным категориям «чистые» и «особо чистые» (табл. 5).

В восточном районе озера минимальное значение ОЧБ выявлено в литоральной зоне Андрусовской бухты в 2006 г., а максимальное – в устье Свири в 2010 и 2014 гг. (табл. 4). Наиболее высокий уровень развития бактериопланктона в этом районе обнаруживался в устье р. Свирь, что неудивительно, т. к. Свирь – крупная река (второй по величине приток Ладожского озера), на водосборном бассейне которой осуществляется активная хозяйственная деятельность, в том числе расположены две ГЭС [Схема..., 2015]. Медиана концентрации бактериопланктона за исследованный период в устье р. Свирь составляла 3,6 млн кл/мл. На остальной акватории восточного побережья ОЧБ за исследованный период колебалась от 1,37 до 4,10 млн кл/мл, при медиане 2,37 млн кл/мл. Однако различие концентраций бактериопланктона в устье р. Свирь и остальной акватории восточного побережья статистически недостоверно при  $p < 0,05$ . На всех станциях максимальная численность микроорганизмов отмечалась в 2014 г.

На основании медианы концентрации микроорганизмов за исследованный период трофический статус водных масс восточного побережья соответствует слабomezотрофному [Копылов, Косолапов, 2007].

Наименьшие медианные значения соотношения численности сапрофитных бактерий и ОЧБ получены для восточного района Ладоги (табл. 5).

Вблизи открытого берега Свирской губы (ст. 8гх) численность сапрофитных бактерий была самой высокой на всем восточном побережье – 415 КОЕ/мл (табл. 4). Сложно судить о степени антропогенного воздействия на литораль Свирской губы по одному году исследования. Это открытый залив со сложной системой течений, поэтому при различных ветровых ситуациях загрязнение может обнаруживаться в разных участках. В устье Свири (ст. 6) концентрация сапрофитов была невелика, однако отмечался рост ОКБ, правда, незначительный (15 КОЕ/100 мл). Минимальное количество сапрофитов отмечалось в Андрусовской бухте. Бухта входит в состав заказника «Андрусово»

[Заповедная...], чем, видимо, и объясняется низкая численность сапрофитов и отсутствие ОКБ в ее водах. На литоральных станциях восточного побережья в 2019 г. ОКБ в пробах воды отсутствовали (кроме устья р. Свирь).

По величинам соотношений численности сапрофитов и ОЧБ водные массы литоральной зоны восточного района относятся к условным категориям «чистые» и «особо чистые» (табл. 5).

## Заключение

Судя по средним величинам ОЧБ за 2006, 2010, 2014 и 2019 гг., водные массы большей части исследованной литоральной зоны Ладожского озера имеют мезотрофный статус, что согласуется с данными по концентрации хлорофилла *a* и биомассе фитопланктона в конце 1990-х – первой декаде 2000-х [Распопов и др., 1998; Протопопова, 2011]. Отдельные участки, акватории которых подвергаются антропогенному воздействию, являлись мезотрофно-эвтрофными.

На некоторых прибрежных участках северного района за последние 14 лет наблюдалось постепенное увеличение количества микроорганизмов в 2,5–3,4 раза и, соответственно, изменение уровня трофии водных масс от олиготрофно-мезотрофного до мезотрофно-эвтрофного. На двух участках литорали западного района, напротив, обнаруживалась тенденция снижения количества микроорганизмов к 2019 г. в 1,5–2 раза. В южном и восточном районах отчетливой тенденции изменения численности микроорганизмов в ту или иную сторону за последние 14 лет не выявлено.

Установленная положительная корреляция между общей численностью микроорганизмов и температурой воды свидетельствует о большей интенсивности процессов самоочищения в более «теплые» 2010 и 2014 гг. в отличие от более «холодных» 2006 и 2019 гг.

Результаты исследований 2019 г. показали, что качество вод во всех районах литоральной зоны Ладожского озера соответствовало условным категориям «чистые» и «особо чистые». Рост ОКБ отмечался лишь на отдельных участках литорали. Основными зонами экологического риска по микробиологическим показателям в 2019 г. являлись: литораль п-ова Рауталаhti; литоральная зона у г. Питкяранты в проливе напротив ЦЗ; Приозерск, устье р. Вуоксы; Щучий залив; мыс Осиновец; Тайполовский залив; акватории вблизи поселков Назия и им. Морозова. Наиболее высокие показатели микробного загрязнения вод выявлены у мыса

Осиновец. На этих же участках акватории регистрировался и значительный процент палочковидных форм бактерий.

В перспективе следует ожидать дальнейшего развития промышленности, сельского хозяйства, транспортной инфраструктуры и т. д. на водосборе и, соответственно, усиления антропогенного пресса на озеро, особенно на его литоральную зону. В связи с этим для предотвращения негативных изменений возникает необходимость в усилении контроля за состоянием озера, в частности, проведении экологического мониторинга его прибрежных районов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».*

## Литература

- Александрова Д. Н., Капустина Л. Л.* Бактериальные сообщества в озере // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 156–163.
- Андроникова И. Н., Распопов И. М., Курашов Е. А.* Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера, выявленные на основе гидробиологических и гидрохимических показателей // Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 366–381.
- Дзюбан А. Н., Косолапов Д. Б., Корнева Л. Г., Кузнецова И. А., Столбунова В. Н.* Комплексная оценка экологического состояния мелководий Рыбинского и Горьковского водохранилищ // Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 3–8.
- Заповедная Россия* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zapoved.net/index.php/katalog/regiony-rossii/severo-zapadnyj-fo/respublika-kareliya> (дата обращения: 11.05.2020).
- Капустина Л. Л.* Бактериопланктон литоральной зоны Ладожского озера // Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 139–155.
- Капустина Л. Л.* Бактериопланктон Ладожского озера // Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 289–298.
- Киреева И. Ю.* Морфобиологические и структурные показатели бактериопланктона как биоиндикаторы // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сб. матер. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2007 г.). СПб., 2007. С. 191–193.
- Кожова О. М., Дутова Н. В.* Морфологическое разнообразие планктонных бактерий как показатель качества вод // Гидробиологический журнал. 1989. Т. 25, № 1. С. 42–48.
- Копылов А. И., Косолапов Д. Б.* Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сб. матер. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2007 г.). СПб., 2007. С. 176–181.
- Копылов А. И., Косолапов Д. Б.* Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. М.: СГУ, 2008. 377 с.
- Кузнецов С. И.* Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. М.: Наука, 1970. 440 с.
- Кузнецов С. И., Дубинина Г. А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.
- Курашов Е. А., Распопов И. М., Андроникова И. Н.* Введение. Литоральная зона (термины, понятия, проблематика, история изучения, описание точек отбора) // Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 10–27.
- Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: атлас* / Отв. ред. В. А. Румянцев. СПб.: ИНОЗ РАН, Нестор-История, 2015. 200 с.
- Мир турбаз* [Электронный ресурс]. URL: <https://mirturbaz.ru/russia/leningradskaya/burnaya-ladoga> (дата обращения: 26.04.2020).
- МУК 4.2.1884-04-2004.* Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. М.: Изд-во стандартов, 2004. 41 с.
- Науменко М. А.* Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 62–72.
- Осиновецкий маяк – достопримечательность по дороге в крепость Орешек* [Электронный ресурс]. URL: <https://petrokrepost.ru/osinovetskij-mayak-dostoprimechatelnost-po-doroge-v-krepost-oreshek/> (дата обращения: 31.05.2020).
- Правительство подписало соглашение с концерном Stora Enso* [Электронный ресурс]. URL: <http://rk.karelia.ru/ekonomika/pravitelstvo-karelii-podpisalo-soglashenie-s-kontsernom-storaenso/> (дата обращения: 11.05.2020).
- Протопопова Е. В.* Фитопланктон литоральной зоны Ладожского озера // Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 102–127.
- Распопов И. М., Андроникова И. Н., Слепухина Т. Д., Расплетина Г. Ф., Рычкова М. А., Барбашова М. А., Доценко О. Н., Протопопова Е. В.* Прибрежно-водные экотоны больших озер. СПб., 1998. 54 с.
- Распопов И. М.* Видовое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2009. № 7. С. 173–180.
- Родина А. Г., Кузьмицкая Н. К.* Численность и распределение бактериопланктона в Ладожском озере // Микробиология. 1963. Т. XXXII, вып. 2. С. 288–295.
- Романенко В. И.* Микробиологические показатели качества воды и методы их определения // Водные ресурсы. 1979. № 6. С. 140–153.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений* / Под ред. В. А. Абакумова. М.: Гидрометеиздат, 1982. 56 с.
- СанПиН 2.1.5.980-00.* Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Ги-

гиенические требования к охране поверхностных вод. М.: Изд-во стандартов, 2001. 18 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Нева. 2015. 150 с. URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/scheme-of-complex-use-and-protection-of-water-bodies-in-the-basin-of-the-river-neva/> (дата обращения: 26.04.2020).

*Boulion V. V., Hakanson L. A.* A new general dynamic model to predict biomass and production of bac-

terioplankton in lakes // *Ecol. Model.* 2003. Vol. 160. P. 91–114. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00326-5

*Hobbie L. E., Daley R. I., Jasper S.* Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // *Appl. Environ. Microbiol.* 1977. Vol. 33(5). P. 1225–1228.

*Wetzel R. G.* *Limnology.* Philadelphia: Saunders Publishing, 1982. 860 p.

Поступила в редакцию 18.06.2020

## References

*Aleksandrova D. N., Kapustina L. L.* Bakterial'nye sobshchestva v ozere [Bacterial communities in a lake]. Leningrad: Nauka, 1982. P. 156–163.

*Andronikova I. N., Raspopov I. M., Kurashov E. A.* Zony ekologicheskogo riska v pribrezhnykh raionakh Ladozhskogo ozera, vyavlenyye na osnovе gidrobiologicheskikh i gidrokhimicheskikh pokazatelei [Zones of ecological risk in the coastal areas of Lake Ladoga, identified on the basis of hydrobiological and hydrochemical indicators]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. P. 366–381.

*Dzyuban A. N., Kosolapov D. B., Korneva L. G., Kuznetsova I. A., Stolbunova V. N.* Kompleksnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya melkovodii Rybinskogo i Gor'kovskogo vodokhranilishch [Complex assessment of an ecological status of the littoral zones in the Rybinsk and Gorkiy reservoirs]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2007. No. 4. P. 3–8.

*Kapustina L. L.* Bakterioplankton litoral'noi zony Ladozhskogo ozera [Bacterioplankton of the littoral zone of Lake Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. P. 139–155.

*Kapustina L. L.* Bakterioplankton Ladozhskogo ozera [Bacterioplankton of Lake Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. P. 289–298.

*Kireeva I. Yu.* Morfobiologicheskie i strukturnye pokazateli bakterioplanktona kak bioindikatory [Morphobiological and structural indicators of bacterioplankton as bioindicators]. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovod. ekosistem*: Sb. mat. mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 23–27 okt. 2007 g.) [Bioindication in freshwater ecosystem monitoring: Proceed. int. conf. (St. Petersburg, Oct. 23–27, 2007)]. St. Petersburg, 2007. P. 191–193.

*Kozhova O. M., Dutova N. V.* Morfologicheskoe raznoobrazie planktonnykh bakterii kak pokazatel' kachestva vod [Morphological diversity of planktonic bacteria as an indicator of water quality]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 1989. Vol. 25, no. 1. P. 42–48.

*Kopylov A. I., Kosolapov D. B.* Mikrobiologicheskie indikatorы evtrofirovaniya presnykh vodoemov [Microbial indicators of eutrophication of freshwater ecosystems]. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovod. ekosistem*: Sb. mat. mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 23–27 okt. 2007 g.) [Bioindication in freshwater ecosystem monitoring: Proceed. int. conf. (St. Petersburg, Oct. 23–27, 2007)]. St. Petersburg, 2007. P. 176–181.

*Kopylov A. I., Kosolapov D. B.* Bakterioplankton vodokhranilishch Verkhnei i Srednei Volgi [Bacterioplankton of reservoirs of the Upper and Middle Volga]. Moscow: SGU, 2008. 377 p.

*Kuznetsov S. I.* Mikroflora ozer i ee geokhimicheskaya deyatel'nost' [Microflora of lakes and its geochemical activity]. Moscow: Nauka, 1970. 440 p.

*Kuznetsov S. I., Dubinina G. A.* Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov [Methods for studying aquatic microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 285 p.

*Kurashov E. A., Raspopov I. M., Andronikova I. N.* Vvedenie. Litoral'naya zona (terminy, ponyatiya, problematika, istoriya izucheniya, opisanie tochek otbora) [Introduction. The littoral zone (terms, concepts, problems, study history, and description of sampling sites)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. P. 10–27.

*Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya: atlas* [Lake Ladoga and its coastal attractions: an atlas]. Eds. V. A. Rumyantsev. St. Petersburg: INOZ RAN, Nestor-Istoriya, 2015. 200 p.

*Mir turbaz* [World of campsites]. URL: <https://mirturbaz.ru/russia/leningradskaya/burnaya-ladoga> (accessed: 26.04.2020).

*Metodicheskie ukazaniya 4.2.1884–04–2004. Sanitarno-mikrobiologicheskii i sanitarno-parazitologicheskii analiz vody poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov* [Methodical instructions 4.2.1884-04-2004. Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water from surface aqueous entities]. Moscow: Publ. house of standards, 2004. 41 p.

*Naumenko M. A.* Analiz morfometricheskikh kharakteristik podvodnogo rel'efa Ladozhskogo ozera na osnovе tsifrovoi modeli [Analysis of morphometric characteristics of bottom relief of Lake Ladoga on the basis of the digital model]. *Izv. RAN. Ser. Geogr* [Proceed. RAS. Geographical Ser.]. 2013. No. 1. P. 62–72.

*Osinovetskii mayak – dostoprimechatel'nost' po doroge v krepost' Oreshok* [Osinovets lighthouse is an attraction on the way to the Oreshok Fortress]. URL: <https://petrokrepost.ru/osinovetskij-mayak-dostoprimechatelnost-po-doroge-v-krepost-oreshek/> (accessed: 31.05.2020).

*Pravitel'stvo podpisalo soglasenie s kontsernom Stora Enso* [Government signs agreement with the Stora Enso concern]. URL: <http://rk.karelia.ru/ekonomika/pravitelstvo-karelii-podpisalo-soglasenie-s-kontsernom-storaenso/> (accessed: 11.05.2020).

*Protopopova E. V.* Fitoplankton litoral'noi zony Ladozhskogo ozera [Phytoplankton of the littoral zone of Lake Ladoga]. *Litoral'naya zona Ladozhskogo ozera* [Littoral zone of Lake Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. P. 102–127.

*Raspopov I. M., Andronikova I. N., Slepukhina T. D., Raspletina G. F., Rychkova M. A., Barbashova M. A.,*

Dotsenko O. N., Protopopova E. V. Pribrezhno-vodnye ekotony bol'shikh ozer [Coastal-aquatic ecotones of large lakes]. St. Petersburg, 1998. 54 p.

Raspopov I. M. Vidovoe raznoobrazie vysshikh vodnykh i pribrezhno-vodnykh rastenii v litoral'noi zone Ladozhskogo ozera [Species diversity of higher aquatic plants and coastal aquatic plants in the littoral zone of Lake Ladoga]. *Fitoraznoobrazie Vostochnoi Evropy* [Phytodiversity of Eastern Europe]. 2009. No. 7. P. 173–180.

Rodina A. G., Kuz'mitskaya N. K. Chislennost' i raspredelenie bakterioplanktona v Ladozhskom ozere [The abundance and distribution of bacterioplankton in Lake Ladoga]. *Mikrobiol.* [Microbiol.]. 1963. Vol. XXXII, iss. 2. P. 288–295.

Romanenko V. I. Mikrobiologicheskie pokazateli kachestva vody i metody ikh opredeleniya [Microbiological indicators of water quality and methods for their determination]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1979. No. 6. P. 140–153.

Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozhenii [Manual for hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments]. Ed. V. A. Abakumov. Moscow: Gidrometeoizdat, 1982. 56 p.

SanPiN 2.1.5.980-00. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'evogo vodopostavleniya. Kontrol' kachestva. Sanitarno-epidemi-

logicheskie pravila i normativy [Sanitary norms and rules 2.1.4.1074-01. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Sanitary and epidemiological rules and regulations]. Moscow: Publ. house of standards, 2001. 18 p.

Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i okhrany vodnykh ob'ektov basseina reki Neva [Scheme of the integrated use and protection of aqueous entities of the Neva River basin]. 2015. 150 p. URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/scheme-of-complex-use-and-protection-of-water-bodies-in-the-basin-of-the-river-neva> (accessed: 26.04.2020).

Zapovednaya Rossiya [Protected areas in Russia]. URL: <http://www.zapoved.net/index.php/katalog/regiony-rossii/severo-zapadnyj-fo/respublika-kareliya> (accessed: 11.05.2020).

Boulion V. V., Hakanson L. A. A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lakes. *Ecol. Model.* 2003. Vol. 160. P. 91–114. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00326-5

Hobbie L. E., Daley R. I., Jasper S. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 1977. Vol. 33(5). P. 1225–1228.

Wetzel R. G. Limnology. Saunders Publishing. Philadelphia, 1982. 860 p.

Received June 18, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Митрукова Галина Геннадьевна

научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.  
Институт озероведения РАН,  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН)  
ул. Севастьянова 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: galya-21@mail.ru

### Капустина Лариса Леонидовна

старший научный сотрудник, к. б. н.  
Институт озероведения РАН,  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН)  
ул. Севастьянова 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105

ведущий 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: larisa.kapustina@mail.ru

### Курашов Евгений Александрович

заведующий лаб. гидробиологии, д. б. н., проф.  
Институт озероведения РАН,  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ 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:

### Mitrukova, Galina

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia  
e-mail: galya-21@mail.ru

### Kapustina, Larisa

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)  
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: larisa.kapustina@mail.ru

### Kurashov, Evgeny

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)  
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

## ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 551.312:551.8 (470.22)

### ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ КАРЕЛИИ В ГОЛОЦЕНЕ (ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ ОЗЕР)

**Т. С. Шелехова, Н. Б. Лаврова**

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

Приведены результаты исследования донных отложений двух малых безымянных озер, расположенных с проксимальной стороны от ледниковых образований стадии сальпаусселькя II (калевальской) на разных гипсометрических уровнях в пределах ледниково-озерной и моренной равнин. Использование комплекса методов, включающего спорово-пыльцевой, диатомовый и радиоуглеродный ( $C^{14}$ ) анализы, позволило получить новые данные о начале формирования озер, этапах их развития, седиментации органических отложений и влиянии локальных геоморфологических условий на состав спорово-пыльцевых спектров и диатомовых комплексов в различные палеоклиматические периоды голоцена. Согласно полученным данным, образование озер началось практически синхронно с отступанием ледника. В пребореальном периоде в озерах накапливались терригенные осадки. Смена их органогенными отложениями произошла около  $9140 \pm 220$  ( $C^{14}$ ) л. н., что на 200–450 лет позже, чем в восточной и юго-западной частях краевых образований калевальской стадии. Зафиксирован перерыв в осадконакоплении донных отложений одного из озер, расположенного на более высокой абсолютной отметке, обусловленный падением уровня водоема в бореале вследствие ксерофитизации климата и гляциоизостатического подъема Фенноскандинавского кристаллического щита. Выполнена реконструкция динамики растительности с пребореала до современности.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** стадия сальпаусселькя II; голоцен; донные отложения; спорово-пыльцевой анализ; диатомовый анализ; палеогеографические реконструкции.

#### **T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova. PALEO GEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS OF THE NORTHWEST KARELIA REGION EVOLUTION IN THE HOLOCENE BASED ON THE STUDY OF SMALL LAKE SEDIMENTS**

The results of a study of bottom sediments from two small nameless lakes located on the proximal side of Salpausselkä II (Kalevala) glacial deposits at various elevations within glacial-lacustrine and morainic plains are reported. Using a set of methods, including spore-pollen, diatom and radiocarbon ( $C^{14}$ ) analyses, new data were obtained

on the onset of the formation of the lakes, stages of their development, sedimentation of organic sediments and the effect of local geomorphological conditions on the composition of spore-pollen spectra and diatom complexes in different paleoclimatic periods in the Holocene. Evidence shows that the lakes began to form virtually simultaneously with glacial retreat. Terrigenous sediments accumulated in the lakes in Preboreal time. They were replaced by organic sediments about  $9140 \pm 220$  ( $C^{14}$ ) B. P., i. e. 200–450 years later than in the eastern and southeastern parts of Kalevala marginal deposits. A hiatus was revealed in the deposition of bottom sediments in one of the lakes lying at a higher absolute elevation. The hiatus was due to a drop in the water level in Boreal time caused by a change to a more xeric climate and a glacioisostatic uplift of the crystalline Fennoscandian Shield. Vegetation dynamics from Preboreal time to the present day was reconstructed.

**Key words:** Salpausselkä II stage; Holocene; bottom sediments; spore-and-pollen analysis; diatom analysis; paleogeographic reconstructions.

## Введение

Палеогеографические исследования приобретают в последнее время всевозрастающую актуальность в связи с решением задач, связанных с пониманием сценариев развития природной среды в будущем при глобальных климатических изменениях. Комплексное изучение донных отложений с использованием спорово-пыльцевого, диатомового анализов и радиоуглеродных датировок позволяет с достаточно высокой надежностью восстановить историю накопления донных отложений и выполнить реконструкции палеоклиматических условий водосборной территории. Выбор территории, расположенной в проксимальном направлении (к западу) от краевых ледниковых образований калевальской стадии (сальпаусселькя II), определялся недостаточной изученностью ее палеогеографии. Следует отметить, что геолого-геоморфологическим исследованиям посвящена обширная литература [Демидов, Лукашов, 1998; Лукашов, 1998, 2003; Елина и др., 2005; Шелехова, 2019]. Однако вопросы палеолимнологии, в частности озерообразования и развития озер, остаются недостаточно изученными. Ранее проведенное районирование территории Карелии по времени образования озер [Экман и др., 1988] впоследствии было уточнено и изменено для юго-восточной части Карелии. Согласно этой схеме образование озер в южной и юго-восточной Карелии началось в аллеред-доаллередское время. В результате дальнейших исследований установлено, что озерообразование в юго-восточной Карелии началось не ранее аллереда, большинство озер в этой части региона образовались позднее, некоторые из них даже в голоцене. Это было обусловлено особенностями отступления ледника на ранних стадиях, происходившего с образованием длительно суще-

ствовавших массивов и полей мертвого льда [Демидов, 2005]. В соответствии с предложенной схемой образование малых озер в северо-западной Карелии началось не ранее 10 000 лет назад. Новые данные, подтвержденные радиоуглеродными датировками, уточняют эту схему и позволяют реконструировать палеогеографические события на рассматриваемой территории. Район исследования находится в северо-западной Карелии в 33 км от краевых ледниковых образований стадии сальпаусселькя II, коррелируемой с позднедриасовым похолоданием. На территории Карелии этот пояс краевых ледниковых образований, представленный сериями конечно-моренных напорных гряд и сопряженных с ними флювиогляциальных дельт, конусов выноса и зандровых равнин, прослеживается на субмеридиональном участке от северного побережья оз. Северное Куйто через западные побережья озер Нюк и Тикшозеро к пос. Лендеры у границ с Финляндией [Niemelä et al., 1993]. Дегляциация района началась в самом начале голоцена, во время так называемого половецкого потепления. В исследуемом водоеме началось накопление минеральных осадков. По данным [Ekman, Iljup, 1995], начало накопления наиболее древних горизонтов органики в пределах краевого пояса стадии сальпаусселькя II в районе пос. Лендеры и соседних районах Финляндии (в 130 км южнее района исследований) составляет от  $9540 \pm 300$  до  $9700 \pm 150$  ( $C^{14}$ ) лет назад (=11 200–10 600 календарных лет). Возраст пояса краевых образований стадии сальпаусселькя II оценивается в 11 800–11 600 календарных лет (10 200–10 000 лет по  $C^{14}$ ) [Lunkka et al., 2004]. Если согласиться со скоростью отступления ледника [по: Демидов, 2005] 20 км/100 лет, то исследуемая территория должна была освободиться ото льда около 11 630–11 430 календарных лет назад

(9800–9600 C<sup>14</sup>). Эта дата является весьма приблизительной, поскольку скорость дегляциации ледникового покрова в различных регионах зависела не только от климата, но и от рельефа подстилающей поверхности, мощности ледникового покрова. Следует отметить также, что начало озерной седиментации в пределах приледниковых бассейнов может происходить с задержкой в несколько сотен лет [Heikkilä, 2009].

Анализ микрофоссилий донных отложений малых водоемов голоцена наряду с радиоуглеродным датированием позволяет уточнить время зарождения озер, выявить основные тренды развития окружающей среды на исследуемой территории, а также использовать палеогеографические реконструкции для прогноза реакции экосистем на климатические изменения.

Основной целью представленной работы является восстановление истории формирования озерных отложений малых водоемов к западу от краевых образований сальпаусселькя II, эволюции растительного покрова окружающих исследованные озера территорий, гидрологических обстановок на фоне климатических изменений.

### Район исследований

Исследуемая территория расположена в Западно-Карельском геоморфологическом районе и представляет собой полого-волнистую равнину с преобладанием абсолютных отметок от 200 до 140 м. Четвертичные отложения представлены основной мореной незначительной мощности, нивелирующей денудационно-тектонический рельеф поверхности. Территория расположена в пределах умеренно-континентального климатического пояса. Климат характеризуется как переходный от морского к континентальному. Среднегодовая температура воздуха 0,5°. Средняя температура июля +15°, января и февраля –12°. Среднее количество осадков составляет около 530 мм. Основные типы почв – подзолистые, болотно-подзолистые и болотные. Подзолистые почвы представлены иллювиально-гумусово-железистыми подзолами, которые приурочены к моренным песчаным и супесчаным отложениям. На территории исследования наибольшее распространение имеют сосновые леса северо-таежного типа.

**Озеро I**, с абсолютной отметкой (абс. отм.) уреза воды над уровнем моря 141,5 м (N64°20'35", E31°27'16"), имеет вытянутую

в субширотном направлении изометричную форму, непроточное, окружено болотом, расположено вблизи озер Малое и Большое Пертиярви в пределах пологоволнистой ледниково-озерной равнины, сложенной серо-бежевыми мелкозернистыми песками с небольшим количеством гравия (рис. 1). Площадь его не превышает 0,028 км<sup>2</sup>.

**Озеро II**, с абс. отм. 190 м над уровнем моря (N64°32'37", E30°44'11"), расположено на границе мелкохолмистой моренной равнины и ледниково-озерной равнины. Оно имеет округлую форму, непроточное, площадью около 0,16 км<sup>2</sup>, также окружено болотным массивом. По-видимому, это болото было заливом существовавшего ранее более крупного водоема, объединявшего озера Курккоярви и Айттарви (рис. 1).

### Материалы и методика

Материалом для данной работы послужили керны донных отложений из озер, полученные летом 2018 года с помощью отечественного ручного пробоотборника (модифицированного Инсторфа, диаметром 52 мм) с примыкающих к побережьям озер сплавин. Образцы отбирались с перекрытием в несколько сантиметров. Стратиграфические последовательности обоих разрезов представлены в табл. 1. Образцы были отобраны послойно, без перерывов, каждые 5–10 см, в зависимости от литологии осадков.

В озере I отобрано 25 образцов с глубины 370–150 см (мощность 220 см). В озере II получен керн мощностью 285 см с глубины 405 см, отобрано 37 образцов.

В обеих скважинах базальные горизонты представлены минеральными осадками – песками и алевритами, перекрывающимися органическими сапропелями, торфянистыми сапропелями и торфом.

Техническая обработка проб и приготовление постоянных препаратов на диатомовый анализ выполнялись по общепринятой методике [Диатомовый..., 1949; Диатомовые..., 1974; Давыдова, 1985], при идентификации флоры использовалась различная справочная литература [Определитель..., 1951; Molder, Tynni, 1967–1973; Tynni, 1975–1980; Krammer, Lange-Bertalot, 1991; Баринаева и др., 2006; Генкал, Трифонова, 2009; Генкал, Чекрыжева, 2011; Генкал и др., 2013, 2015; Куликовский и др., 2016].

Обработка проб для палинологического анализа осуществлялась по общепринятым методикам [Пыльцевой..., 1950]: применяли ще-

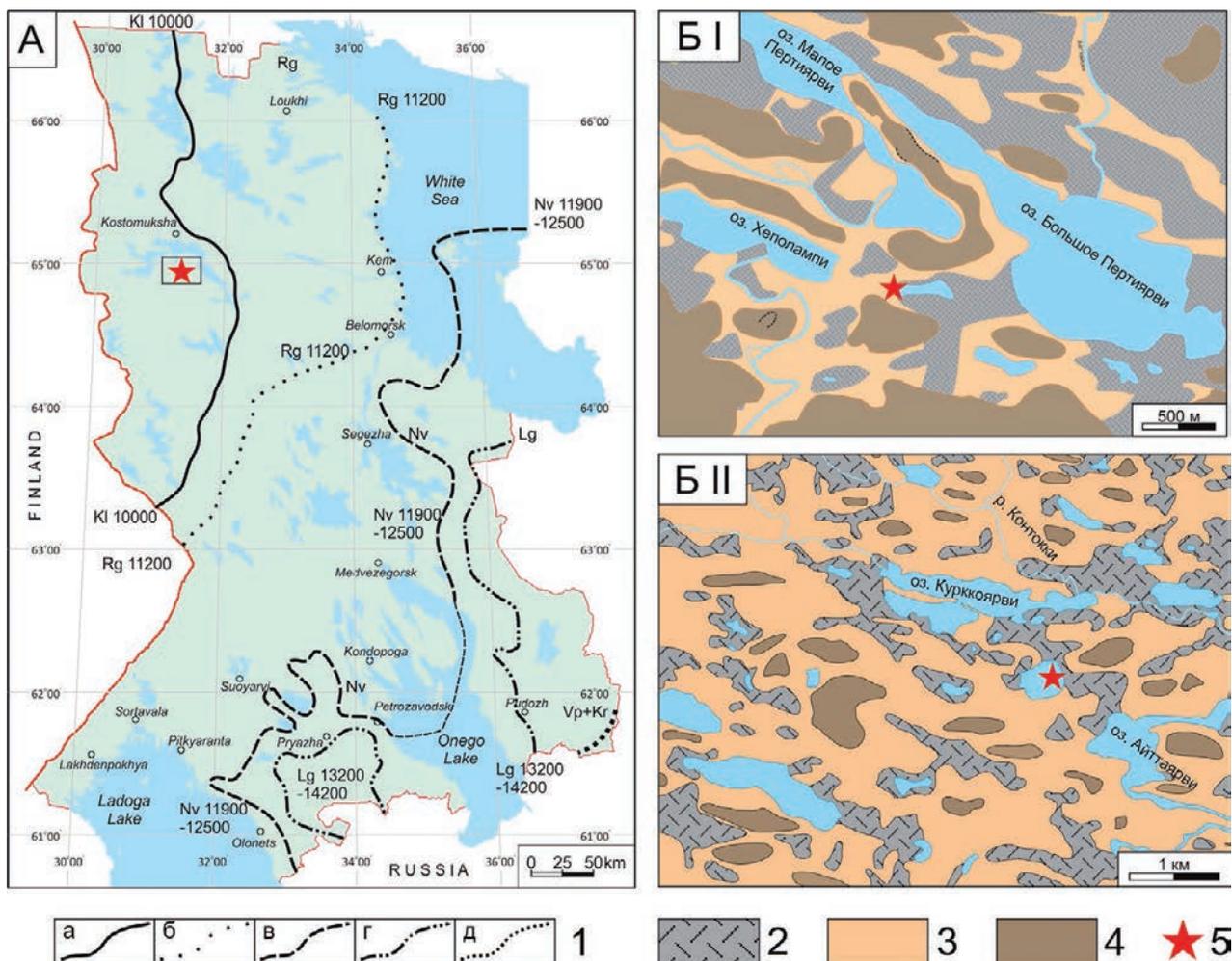


Рис. 1. Местоположение изученных разрезов:

A – положение разрезов относительно краевых образований; 1 – стадии деградации поздневалдайского ледника [по: Ekman, Iljin, 1995]: а – калевальская (сальпаусселькя II), б – ругозерская (сальпаусселькя I), в – невская, г – лужская, д – вепсовско-крестецкая. Б I – расположение озера I, Б II – расположение озера II; 2 – болота, 3 – пологоволнистая моренная равнина, 4 – холмистая моренная равнина, 5 – изученные водоемы

Fig. 1. Location of the studied sections:

A – position of the sections relative to marginal deposits; 1 – Late Valdai glacier degradation stages [after: Ekman & Iljin, 1995]: a – Kalevala (Salpausselkä II), b – Rugozerian (Salpausselkä I), c – Neva, d – Luga, e – Vepsavian-Krestets. Б I – location of lake I, Б II – location of lake II; 2 – mires, 3 – gently undulating morainic plain, 4 – hilly morainic plain, 5 – studied water bodies

лочной метод Поста и ацетолитный Эрдтмана. Для выделения пыльцы и спор из минеральных осадков использовали сепарационный метод В. П. Гричука. При идентификации пыльцевых зерен привлекали справочники-определители [Куприянова, Алешина, 1972, 1978; Бобров и др., 1983; Moore et al., 1991 и др.], а также эталонную коллекцию пыльцы и спор Института геологии КарНЦ РАН. Спорово-пыльцевые диаграммы (СПД) построены с использованием компьютерных программ TILIA и TILIA GRAPH [Grimm, 1992]. Подсчет процентных соотношений проводился от общей суммы пыльцы и спор. Наряду с палинологическим анализом

идентифицировали водоросли *Pediastrum* [по: Komárek, Jankovska, 2001].

Из кернов обоих озер отобраны образцы на радиоуглеродный анализ, выполненный в лаборатории Санкт-Петербургского университета. Полученные результаты представлены в табл. 2.

## Результаты

По результатам обоих анализов построены спорово-пыльцевые и диатомовые диаграммы. При периодизации СПД использовался сопряженный анализ палинологических и радиоугле-

Таблица 1. Стратиграфия донных отложений исследованных озер

Table 1. Stratigraphy of bottom sediments from the studied lakes

Глубина, см Depth, cm	Озеро I, абс. отм. 141,5 м Lake I, 141,5 m above sea level N64°20'35.6", E31°27'16"	Глубина, см Depth, cm	Озеро II, абс. отм. 190 м Lake II, 190 m above sea level N64°32'37.9", E30°44'11"
370–365	мелко-тонкозернистый песок серого цвета fine-grained gray sand	405–398	гомогенный алеврит серого цвета с голубоватым отливом; контакт с вышележащим горизонтом ровный, отчетливый, отличается по цвету и составу homogeneous steel-gray silt; the contact with the overlying horizon is smooth, distinct, various in color and composition
365–357	сапропель (возможно, диатомовый) го-могенный оливкового цвета; контакт с вышележащим слоем отчетливый, ровный, отличается тонкой, около 1 мм, полоской белесого цвета (возможно, диатомит) homogeneous olive color sapropel (possibly diatomaceous); contact with the overlying layer is distinct, smooth, characterized by a thin, about 1 mm, whitish strip (possibly diatomite)	398–382	алеврит с незначительной примесью органики (в соотношении примерно 90/10 %), цвет серовато-коричневый, на гл. 392–393 см черная примазка органики (возможно, разложившийся уголек); вышележащий контакт четкий, резкий, отличается по цвету и литологии осадков silt with a slight admixture of organic matter (about 90/10 %), grayish-brown color, at a depth of 392–393 cm there is black patch of organic matter (possibly decomposed ember); the overlying contact is distinct, sharp, different in color and lithology of sediments
357–275	сапропель грязно-коричневого цвета с большим количеством полуразложившихся растительных остатков, разжиженный (обводненный); переход к вышележащему горизонту постепенный sapropel of a dirty brown color with a large amount of semi-decomposed plant residues, liquefied (watered); transition to the overlying horizon is gradual	382–357	тонко-мелкозернистые пески с примесью алеврита с заметной горизонтальной слоистостью и волосовидными растительными остатками; на контакте с вышележащими сапропелями песок более грубозернистый (ср/з) fine-grained sands with an admixture of silt with noticeable horizontal stratification and hair-like plant residues; at the contact with the overlying sapropels, the sand is coarser-grained (medium-gr.)
275–210	торфянистый сапропель (80 % торф, 20 % сапропель) или сапропелевый торф коричневого цвета, слегка разжиженный, однородный peaty sapropel (80 % peat, 20 % sapropel) or brown sapropel peat, slightly aqueous, homogeneous	357–345	сапропель оливкового цвета с незначительной примесью песка (2 %) olive color sapropel with a slight admixture of sand (2 %)
210–190	сапропель гомогенный, слегка разжиженный, коричневого цвета, с незначительным содержанием растительных остатков homogeneous, slightly aqueous sapropel of brown color, with a low content of plant residues	345–230	сапропель темно-коричневого (бурого) цвета с полуразложившимися растительными остатками sapropel of dark brown (brown) color with semi-decomposed plant residues
190–150	сапропель торфянистый peaty sapropel	230–165	сапропель светло-коричневый с множеством неразложившихся растительных остатков, постепенно переходящий в торф; контакт с торфом отличается по более светлому цвету, выражается по значительному содержанию растительных остатков light-brown sapropel with many undecomposed plant residues, gradually turning into peat; contact with peat is distinguished by a lighter color, expressed by a significant content of plant residues
		165–120	торф, светло-коричневый peat, light-brown
150–0	вода water	120–0	вода water

родных данных, а также схемы позднеледникова и голоцена [Хотинский, 1977; Елина, 1981], основанные на модели Блитта – Сернандера.

Исходя из этого выделены палинологические зоны (ПЗ), соответствующие климатическим периодам и фазам голоцена.

Таблица 2. Данные радиоуглеродного датирования донных осадков исследованных озер

Table 2. Radiocarbon dating data for bottom sediments from the studied lakes

№ обр. Sample No.	Озера Lake	Абс. отм. над уровнем морья, м A. s. l., m	Лаб. номер Lab. No	Глубина отбора проб Sampling depth	Тип отложений Sediments type	Радиоуглеродный возраст, лет назад Radiocarbon age, years ago	Калиброванный возраст (календарный), кал. лет назад Calibrated age (calendar), cal. years ago
1	I	141,5	ЛУ-9250	3,65–3,55	сапропель оливковый olive color sapropel	9140 ± 220	10320 ± 330
2			ЛУ-9251	2,30–2,20	торфянистый сапропель peaty sapropel	3860 ± 60	4280 ± 90
3	II	190	ЛУ-9248	3,50–3,40	сапропель оливково-черный olive-black color sapropel	7340 ± 90	8160 ± 100
4			ЛУ-9249	2,50–2,40	сапропель бурый brown sapropel	4650 ± 60	5390 ± 100

Примечание. Значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы OxCal 4.3 (калибровочная кривая IntCal13, BOMB13NH1). Christopher Bronk Ramsey (<https://c14.arch.ox.ac.uk>).

Note. The calendar ages are based on the OxCal 4.3 calibration program (calibration curve IntCal13, BOMB13NH1). Christopher Bronk Ramsey (<https://c14.arch.ox.ac.uk>).

## Озеро I

### Спорово-пыльцевой анализ

В построенной диаграмме озера I выделено пять локальных пыльцевых зон (ПЗ) (рис. 2).

**ПЗ I (370–345 см).** Основная особенность этой зоны – нарастание вклада пыльцы древесных пород (60–75 %) при доминировании пыльцы *Betula sect. Albae*, количество которой уменьшается к верхней границе зоны от 53 до 20 %, доля пыльцы *Pinus*, напротив, возрастает от 4 до 45 %. Среди кустарничков преобладает Ericales (до 9 %), травянистых – Cyperaceae и Poaceae, присутствует пыльца *Artemisia*, Chenopodiaceae. В группе споровых доминирует Bryales, отмечены споры Polypodiaceae, *Equisetum*, *Lycopodium pungens*, *Diphasiastrum complanatum*, *Selaginella selaginoides*, *Huperzia appressum*. Некоторые особенности данной палинозоны позволяют разделить ее на две субпалинозоны: в первой (370–359 см) отмечено стабильное содержание *Pinus* (5 %), во второй (359–345 см) – возрастание ее участия в спорово-пыльцевых спектрах (СПС). Противоположную тенденцию демонстрирует пыльца *Betula sect. Albae*. Прерываются кривые *Artemisia* и Chenopodiaceae. Изменения в составе пыльцевых спектров, послужившие основанием для выделения палинозоны в целом и подзон внутри нее, отражают перестройку растительных сообществ, вызванную увеличением теплообеспеченности и влажности. Признаки потепления и повышения влажности климата хорошо прослеживаются на пыльцевой диаграмме по увеличению вкла-

да пыльцы древесных пород. Радиоуглеродная дата  $9170 \pm 220$  С<sup>14</sup> л. н. указывает на то, что формирование спорово-пыльцевых спектров (СПС) палинозоны происходило в начале бореального периода. Но по мнению авторов, основанному на данных палинологического анализа, датировка является несколько омоложенной, а образование СПС данной палинозоны соответствует заключительному этапу пребореального периода (10300–9300 С<sup>14</sup> л. н.).

Основанием для выделения **ПЗ II (345–319 см)** послужило увеличение вклада пыльцы *Pinus* (до 60 %) и снижение доли пыльцы *Betula sect. Albae* (до 20 %), а также дальнейшее повышение удельного веса пыльцы древесных (до 85 %). Насыщенность осадков пыльцой увеличивается. Количество пыльцы Ericales, *Betula nana* уменьшается до долей процента. В группе травянистых доминирует пыльца Cyperaceae и Poaceae, доля каждой из них не превышает 5 %. Вклад пыльцы других трав разнообразен (Fabaceae, Liliaceae, Ranunculaceae, *Thalictrum*, Rosaceae, *Filipendula ulmaria*, Scrophulariaceae и др.), но незначителен в количественном отношении. Среди спор преобладает Bryales. Появляется пыльца прибрежно-водных растений (*Sparganium*). Описанные изменения в составе спектров отражают увеличение роли лесных (сосновых) сообществ под воздействием потепления и дефицита влажности. В соответствии с данными анализа можно предположить, что СПС палинозоны были сформированы в бореальное время (9300–8000 С<sup>14</sup> л. н.).

**ПЗ III (319–254 см).** Основным объединяющим фактором СПС палинозоны является по-

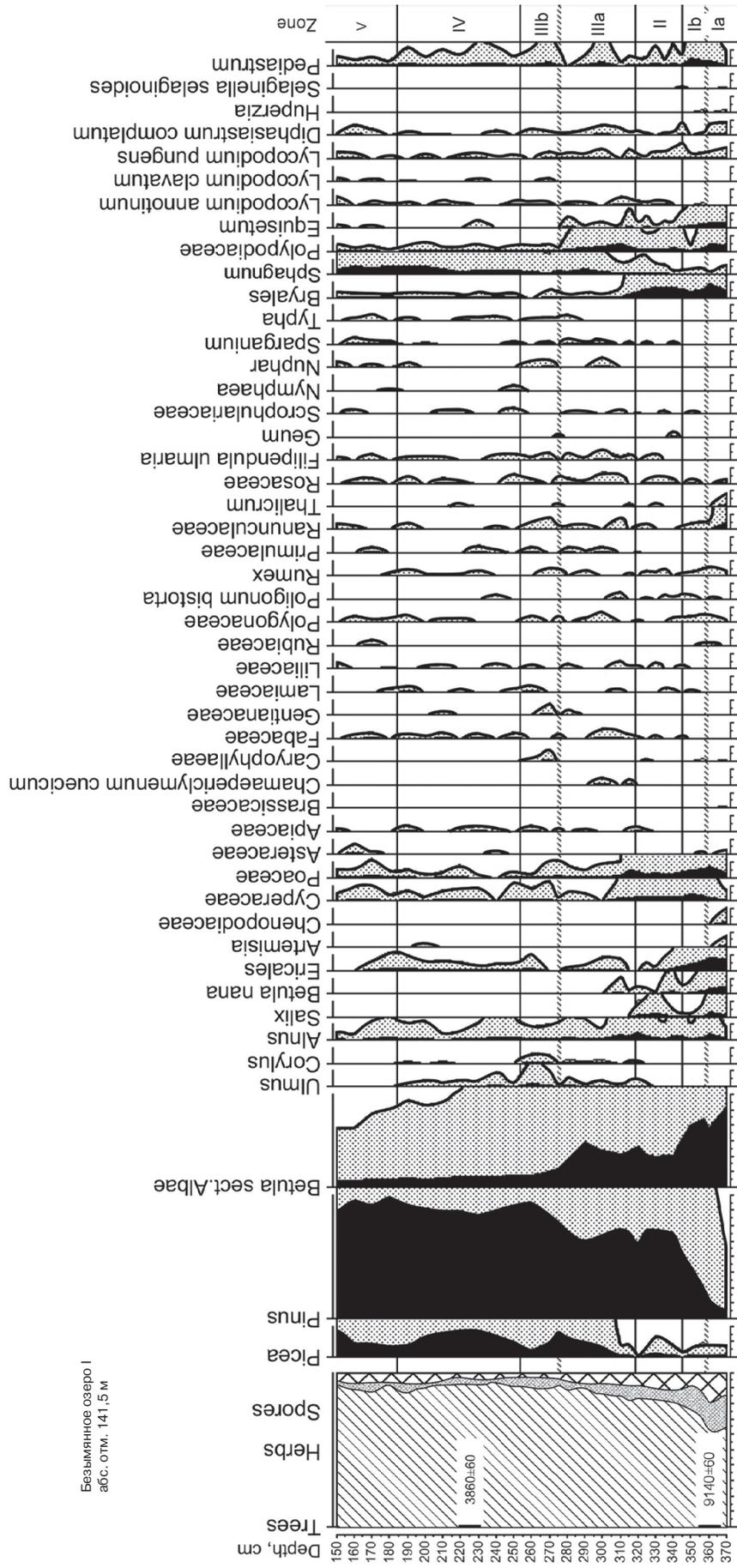


Рис. 2. Спорно-пыльцевая диаграмма донных отложений безымянного озера I (абс. отм. 141,5 м)

Fig. 2. Spore-and-pollen diagram of bottom sediments from nameless lake I (141.5 m a. s. l.)

стоянное присутствие пыльцы термофильных пород *Ulmus*, *Corylus*, *Alnus glutinosa*, что свидетельствует о повышении теплообеспеченности и влажности климата. Это дает основание сделать предположение о формировании данной палинозоны в атлантический период голоцена (8000–4500 С<sup>14</sup> л. н.). Вторая отличительная особенность – увеличение вклада пыльцы *Pinus* (50–78 %). Здесь же отмечена рациональная граница пыльцы *Picea* (18 %). В целом пыльца травянистых разнообразна: идентифицирована пыльца Asteraceae, Apiaceae, Fabaceae, Lamiales, Liliaceae, Polygonaceae, Ranunculaceae, Scrophulariaceae и др. Доминантами являются Poaceae и Cyperaceae. Появляется пыльца прибрежно-водных растений *Sparganium*, *Nuphar*, *Typha*. Ведущими компонентами в группе споровых становятся Polytrichaceae и Sphagnum, увеличивается вклад спор лесных видов плаунов. Некоторые нюансы позволяют выделить две субпалинозоны: IIIa (319–276 см) и IIIb (276–254 см), в первой из них отмечено высокое и стабильное содержание пыльцы *Betula* sect. *Albae* (25–35 %) и увеличение доли *Picea*, во второй – уменьшение вклада *Picea* и *Betula* sect. *Albae*, повышение – *Pinus* и термофильных пород.

**ПЗ IV (254–184 см).** Характерная особенность палинозоны – увеличение вклада пыльцы *Picea* (~20 %), на фоне доминирования пыльцы *Pinus* (70 %). Вторая особенность – падение количества пыльцы *Ulmus*, выклинивание кривой *Corylus* у нижней границы палинозоны, что свидетельствует о похолодании в начале суббореального времени. Данные анализа и радиоуглеродная датировка  $3860 \pm 60$  л. н. позволяют предположить, что СПС данной палинозоны сформировались в суббореальное время (4500–2500 С<sup>14</sup> л. н.).

**ПЗ V (184–150 см)** выделена на основании полного исчезновения из спектров пыльцы термофильных пород, что указывает на изменение климатических условий в сторону похолодания. Для СПС палинозоны характерно самое высокое содержание пыльцы *Pinus* (до 85 %), вклад *Betula* sect. *Albae* незначителен. Отмечено колебание пыльцы ели (доля *Picea* составляет примерно 8 %, а с гл. 160 см увеличивается до 20 %), неустойчивое содержание пыльцы ели в спектрах, скорее всего, обусловлено не колебаниями температурного режима, а изменением влажности климата. Набор пыльцы травянистых разнообразен, несколько увеличивается количество пыльцы водных и прибрежно-водных растений. Среди споровых доминирует *Sphagnum*. Возрастает удельный вес спор плаунов.

### Диатомовый анализ

По результатам диатомового анализа озера I построена диатомовая диаграмма (рис. 3). В разрезе выделено 7 диатомовых зон (DZ), состав диатомовых комплексов отражает палеоэкологические условия развития водоема в голоцене.

**DZ-1 (370–365 см)** выделена по одному образцу в мелко-тонкозернистом песке. Диатомовый комплекс данного интервала значительно отличается от такового в вышележащем слое. Как видно из диатомовой диаграммы, господствующее положение занимают виды из обрастаний, составляющие около 80 % от общего состава флоры и представленные главным образом разнообразными формами рода *Stauroneis* sp. Кроме них в существенно меньших количествах присутствуют створки из родов *Eunotia* sp., *Gomphonema* sp., а также донные родов *Pinnularia* sp., *Stauroneis* sp. Формирование песков происходило в условиях близкой к нейтральной среде pH, в слабоминерализованном водоеме.

**DZ-2 (365–357 см)** выделена в оливковых гомогенных диатомовых сапропелях на основании заметных изменений в составе диатомового комплекса, в котором количество ранее господствовавших видов рода *Stauroneis* sp. резко сократилось (с 80 до 20 %). Появились планктонно-литоральные формы *Tabellaria fenestrata*, характерные для неглубоких северных водоемов. Увеличилось количество и разнообразие форм обрастаний родов *Cymbella* sp., *Gomphonema* sp., *Eunotia* sp., *Tabellaria flocculosa*. Кроме них расширился спектр и донных форм, представленных *Neidium* sp., *Nitzschia* sp., *Pinnularia* sp., *Stauroneis* sp. Все это свидетельствует о возможном снижении уровня водоема, сокращении прибрежной мелководной зоны и похолодании климата. Радиоуглеродная датировка, полученная с гл. 365–355 см (табл. 2.) из диатомовых оливковых сапропелей, залегающих непосредственно на песках, свидетельствует о накоплении осадков  $9140 \pm 220$  л. н. ( $10320 \pm 330$  кал. л. н.), т. е. в пребореале.

**DZ-3 (357–325 см)** выделена в сапропелях с большим количеством неразложившихся растительных остатков. Состав диатомового комплекса вновь претерпевает некоторые изменения. Во-первых, заметно возрастает доля донных форм, среди которых доминируют виды рода *Pinnularia* sp., достигая почти 40 %, что, вероятно, связано со снижением уровня водоема. Роль планктонных сводится до минимума и не превышает 2 %. Также заметно снижается и доля обрастателей *Cymbella* sp., *Gomphone-*



*ma* sp., *Tabellaria flocculosa*, которые вытесняются донными видами *Anomoeoneis* sp., *Frustulia saxonica*, предпочитающими условия кислой среды и развивающимися при pH около 5–5,5. Снижение уровня водоема могло быть связано с сухостью климата в бореальное время.

**DZ-4 (325–290 см)** выделена в темно-коричневых гомогенных сапропелях на основании новых заметных изменений в составе диатомового комплекса. Доля планктонных форм остается неизменной. Содержание донных форм снижается, их вытесняют типичные представители болот – виды обрастаний рода *Eunotia* sp., развитие которых обычно увеличивается в условиях увлажнения климата и усиления процессов заболачивания территорий. Количество видов *Frustulia* sp., *Tabellaria flocculosa* довольно стабильно и не превышает 15 % от общей численности комплекса. Донные формы рода *Anomoeoneis* sp. к концу этапа практически прекращают вегетировать. Стабильно участие основных доминантов, донных рода *Pinnularia* sp., составляющих почти половину диатомового комплекса. Вполне возможно, что процессы заболачивания были связаны с потеплением и увлажнением климата в атлантическое время.

**DZ-5 (290–270 см)**. На данном этапе возрастает роль планктонных форм, их доля повышается с 2 до 20–30 %. Увеличивается содержание и планктонно-литоральных *Tabellaria fenestrata*, появляются в небольшом количестве «мелководные» *Staurosira* sp. Все это свидетельствует о потеплении и увлажнении климата во время климатического оптимума.

**DZ-6 (270–250 см)**. Продолжается накопление торфянистых сапропелей, в которых резко до 90 % возрастает содержание планктонных форм рода *Aulacoseira* sp., характерных для северных водоемов, которым сопутствуют присутствующие на предыдущих этапах формы обрастаний рода *Eunotia* sp. и донные рода *Pinnularia* sp. Господство планктонных является результатом обводнения водоема, возможного в условиях влажного климата атлантического времени.

С гл. 250–160 см диатомовые створки в сапропелях отсутствуют. В развитии водоема для этого времени можно предположить несколько сценариев. Во-первых, данная часть озера, где отбирались образцы, могла быть осушена и развивалась в аэральных условиях. Во-вторых, из-за сухости климата в водоем не поступало достаточного количества питательных веществ и кислорода для развития диатомей, что характерно для условий суббореального времени и отмечается по диатомовым комплексам донных отложений некоторых озер

Карелии [Шелехова, 1998; Шелехова, Лаврова, 2011]. Радиоуглеродная датировка, полученная в пределах этого интервала глубин (табл. 2), свидетельствует о накоплении осадков в суббореальное время и подтверждает наши предположения.

**DZ-7 (160–150 см)** отражена по одному образцу из завершающих разрез торфянистых сапропелей, в которых доминируют формы обрастаний рода *Staurosira* sp., а также типичные болотные виды родов *Eunotia* sp., *Pinnularia* sp., четко отвечая условиям увлажнения климата в субатлантическое время.

## Озеро II

### Спорово-пыльцевой анализ

В построенной диаграмме выделено четыре локальные пыльцевые зоны (рис. 4).

**ПЗ I (400–356 см)**. СПС палинозоны характеризуются довольно высоким содержанием пыльцы трав и кустарничков – 35–40 %, тогда как доля древесных составляет 50 %, спор – ~20 %. Доминирующая пыльца *Betula* sect. *Albae* имеет тенденцию к уменьшению от 37 до 15 %, количество пыльцы *Pinus* увеличивается от 10 до 18 %, количество пыльцы *Picea* не превышает 1–2 %, *Alnus* – 1,5–1 %, *Salix* – 1–1,5 %. Доля *Ericales* уменьшается от 20 до 15 % к верхней границе зоны. Идентифицирована пыльца *Juniperus*. Доля *Artemisia* и *Chenopodiaceae* составляет 2 и 1 % соответственно. Среди пыльцы травянистых преобладает *Cyperaceae* (5–7 %), *Poaceae* (3–5 %), *Ranunculaceae* (7–8 %). Пыльца других травянистых встречается в незначительных количествах, но состав ее весьма разнообразен. В группе споровых преобладает *Bryales*, *Lycopodiaceae* (главным образом *Lycopodium pungens*, *Diphasiastrum complanatum*), *Polypodiaceae*, *Equisetum*, встречается пыльца *Selaginella selaginoides*. Состав пыльцы и спор весьма схож с СПС ПЗ I озера I, в полной мере это касается содержания и тенденций изменения основных компонентов спектров: *Betula* sect. *Albae*, *Pinus*, а также *Ericales*. Данные анализа и близкие результаты, полученные по разрезу озера I, дают основание предполагать, что время формирования этой палинозоны относится к пребореальному периоду.

**ПЗ II (356–248 см)**. Нижняя граница проведена под резким повышением вклада пыльцы *Pinus* и практически совпадает с четким контактом между минеральными и органомными отложениями. СПС отличаются максимумом пыльцы *Pinus* (60–70 %), который обычно свойственен бореальному периоду. Но учитывая

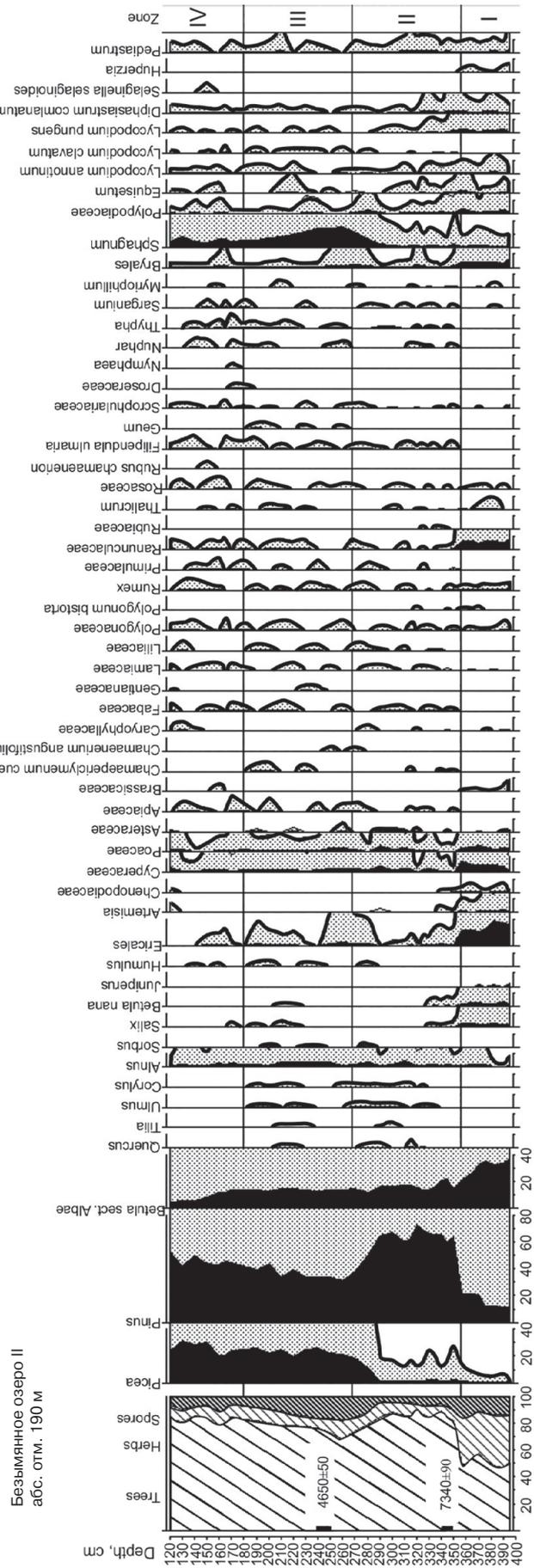


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений безымянного озера II (абс. отм. 190 м)  
 Fig. 4. Spore-and-pollen diagram of bottom sediments from nameless lake II (190 m a. s. l.)

резкий четкий контакт между отложениями, в которых выделена I и II палинозоны, радиоуглеродную дату, а также присутствие в осадках пыльцы термофильных пород (*Quercus*, *Ulmus*, *Corylus*, *Alnus glutinosa*), мы предполагаем, что СПС были сформированы в атлантическое время (8000–4500 С<sup>14</sup> л. н.), а отложения бореала отсутствуют. Это подтверждается двумя радиоуглеродными датировками с гл. 350–340 см – 7340 ± 90 л. н. и гл. 250–240 см – 4650 ± 50 л. н. (табл. 2). Возможно, во время сухого климатического режима в бореале, а также продолжавшегося гляциоизостатического подъема Фенноскандинавского щита уровень воды в водоеме понизился настолько, что формирование осадков прекратилось и возобновилось лишь в условиях влажного климата атлантического времени. Идентифицирована пыльца ели. Примечательно, что в палинозоне, соответствующей атлантическому времени озера I, также отмечена рациональная граница пыльцы *Picea*. Основным компонентом спектров пыльцы травянистых выступает пыльца Роасеае и Суреаеае (их доля колеблется в пределах 3–5 %). Увеличивается разнообразие водных и прибрежно-водных видов *Nuphar*, *Tupha*, *Sparganium*, *Myriophyllum*.

**ПЗ III (248–180 см).** СПС данной палинозоны характеризуются увеличением вклада пыльцы *Picea* (~30 %) на фоне доминирования пыльцы *Pinus* (40–43 %). Доля *Betula* sect. *Albae* составляет 15–20 %. У нижней границы отсутствует пыльца термофильных пород. Выше глубины 240 см пыльца термофильных пород появляется вновь, это было обусловлено климатическими колебаниями: резким похолоданием, а затем новым повышением температурного режима и влажности климата, что характерно для суббореального периода. Состав разнотравья и прибрежно-водных видов не меняется по сравнению с предыдущей палинозоной, в группе споровых значительно возрастает вклад спор *Sphagnum*. Данные анализа и радиоуглеродная датировка 4650 ± 50 л. н. позволяют предположить, что СПС данной палинозоны сформировались в суббореальное время (4500–2500 С<sup>14</sup> л. н.).

**ПЗ IV (180–120 см).** Основная особенность СПС данной зоны – выпадение из СПС неморального комплекса пыльцы и увеличение доли *Picea* (35 %), появление спор гипоарктического вида *Selaginella selaginoides*, что может свидетельствовать о дальнейшем похолодании и увеличении влажности климата. В целом в СПС доминирует пыльца *Pinus* (до 50 %). Сохраняется преемственность в составе группы травянистых и водных, прибрежно-водных ви-

дов, появляется Droseraceae. Среди споровых доминирует *Sphagnum*. Исходя из данных анализа, можно предположить, что формирование СПС рассматриваемой палинозоны происходило в субатлантическом периоде (2500 л. н. – настоящее время).

#### Диатомовый анализ

По результатам диатомового анализа в разрезе выделено 7 диатомовых зон (рис. 5).

**DZ-1 (405–395 см)** – выделена по двум образцам алевритов, к верху интервала обогащенных органикой. Диатомовый комплекс в данных осадках отличается доминированием (около 80 %) эпифитов рода *Staurosira* sp. с разновидностями, заселяющих водоемы в начале развития. Из других эпифитов в незначительных количествах выделены виды рода *Gomphonema* sp., *Tabellaria flocculosa*, *Tetracyclus* sp. Участие планктонных форм не превышает 2 %, а среди донных, которых не более 20 %, представлены виды родов *Navicula* sp., *Nitzschia* sp., *Pinnularia* sp. Биогеография видов свидетельствует о преобладании космополитных форм, при достаточной доле арктоальпийских и бореальных, в сумме составляющих до 40 % от общего состава флоры. Необходимо отметить, что при полном господстве индифферентов по отношению к солености и незначительной доле (до 5 %) галофобов на данном этапе присутствуют, снижаясь с 20 до 10 %, галофилы – это связано с поступлением питательных веществ из свежееотложенных осадков. Реконструированные значения pH близки к нейтральным (немногим превышали 7). Таким образом, все характеристики свидетельствуют о развитии водоема в пребореальное время.

**DZ-2 (390–357 см)** характеризуется резкими изменениями как в литологии осадков, так и в составе диатомового комплекса. В это время в начале этапа накапливались горизонтально-слоистые алевриты с примесью органики серовато-коричневого цвета, с четким контактом сменяющиеся тонко-мелкозернистыми песками с примесью алеврита и волосовидными растительными остатками. Полное господство (от 60 до 96 % флоры) принадлежит прежним формам обрастаний рода *Staurosira* (и их вариациям). Содоминантами (с содержанием до 5 %) выступают обрастатели родов *Cymbella* sp., *Gomphonema* sp., *Tabellaria flocculosa*. Незначительную роль играют донные виды родов *Navicula*, *Nitzschia*. Очень примечательно единичное присутствие видов рода *Epithemia* sp. На данном этапе изменяется состав диатомовой флоры по географическому распростра-



нению – роль арктоальпийских и бореальных форм несколько снижается (в сумме до 20 %), указывая на потепление климата. По отношению к галобности доминируют индифференты. Возрастает pH среды, условия становятся слабощелочными, что свидетельствует о дальнейшем потеплении климата и усилении притока питательных веществ.

**DZ-3 (357–340 см)** выделена в сапропелях с большим количеством растительных остатков, резко сменивших подстилающие их пески. Численность господствующих на предыдущем этапе форм обрастаний заметно снизилась, их вытеснили донные *Amphora* sp., *Frustulia* sp., *Pinnularia* sp., *Stauroneis* sp., *Anomoeoneis* sp., достигающие около 60 %. Полностью исчезли пионерные виды рода *Staurosira*, из эпифитов присутствовали диатомовые родов *Eunotia* sp., *Cymbella* sp., *Tabellaria flocculosa* и др. Среди планктонных форм выявлены единичные створки видов рода *Cyclotella* sp., *Nitzschia kuetzingiana*. Эколого-географические характеристики данного отрезка указывают на преобладание в географическом распространении арктоальпийских и бореальных форм (от 60 до 90 %). В структуре видов по галобности господствуют индифференты, доля мезогалобов и галофилов заметно снижается и не превышает 2–5 %. Следовательно, минерализация воды была очень низкой, что подтверждается и реконструированным значением pH, составляющим не более 5. Все особенности диатомового комплекса данного отрезка формирования водоема свидетельствуют о развитии флоры в относительно холодной воде и кислой среде. Радиоуглеродная датировка с гл. 350–340 см (табл. 2) указывает на формирование осадков в атлантический период.

**DZ-4 (340–320 см)**. В это время в водоеме продолжали накапливаться сапропели. Условия развития флоры были довольно нестабильны: доля планктонных форм с доминированием различных видов рода *Aulacoseira* sp. возросла с 2–5 до 70 %. Поэтому можно предположить, что уровень водоема в это время значительно повысился, возможно, за счет увлажнения климата. Также возросло участие типично болотных видов обрастаний рода *Eunotia* sp., донных форм рода *Pinnularia* sp., что явно указывает на обводнение прибрежной зоны и заболачивание берегов. Кроме них довольно большую роль играли донные формы родов *Anomoeoneis* sp., *Frustulia saxonica*, *Stauroneis* sp., большинство из которых развивается в кислой среде. Это доказывается низкими значениями pH (около 5), а также доминированием индифферентов и ацидофилов по отношению к галобности.

**DZ-5 (320–250 см)** выделена в слое сапропеля с меньшим содержанием неразложившихся растительных остатков по смене в составе диатомового комплекса. На данном этапе еще больше возросла роль видов рода *Eunotia* sp., достигших 70–80 % от общего состава, а также болотных форм донных видов рода *Pinnularia* sp. Доля планктонных родов *Aulacoseira* sp. резко снизилась, причем появились планктонно-литоральные формы *Tabellaria fenestrata*. Почти не изменилось присутствие прежних донных форм *Anomoeoneis* sp., *Frustulia saxonica*, *Stauroneis* sp. Господствовали арктоальпийские и бореальные формы, постепенно увеличиваясь от 20 до 80 % и более. По-прежнему индифференты и ацидофилы составляли примерно одинаковую долю (около 50 %), среда оставалась кислой (pH около 5). Анализируя изменения в структуре комплекса, можно предположить некоторое снижение уровня водоема, что стало возможным в результате уменьшения влажности в конце атлантического периода. Радиоуглеродная датировка с гл. 250–240 см (табл. 2) подтверждает это предположение.

**DZ 6 (250–170 см)**. На данном этапе продолжают накапливаться сапропели, в конце интервала значительно обогащенные неразложившимися растительными остатками. Роль планктонного сообщества, составляя в начале этапа около 20 %, на всем протяжении его не превышает 5 %. Поэтому можно говорить о снижении уровня водоема. Однако господство болотных форм рода *Eunotia* sp. указывает на продолжающиеся процессы заболачивания территории вокруг озера. Присутствуют в практически неизменном количестве донные *Pinnularia* sp., *Frustulia saxonica*, *Stauroneis* sp. Доля галофилов и индифферентов также почти одинакова, значения pH – низкие. Поэтому можно утверждать, что условия среды были кислыми, вода – слабоминерализованной. Снижение уровня водоема произошло в результате сухости климата в суббореальное время.

**DZ-7 (170–120 см)**. Накапливались разжиженные сапропели с растительными остатками. В составе диатомового комплекса резко возросла доля планктонно-литоральных форм *Tabellaria fenestrata*, хотя по-прежнему развивались болотные формы *Eunotia* sp., *Pinnularia* sp. Вероятно, произошло обводнение водоема за счет увлажнения климата, характерного для субатлантического времени.

## Обсуждение

Результаты исследования позволили выделить основные периоды голоцена и реконстру-

ировать этапы развития озер начиная с пребореала. В раннем голоцене после окончательного таяния льда здесь существовали обширные холодные остаточные водоемы, уровень которых снижался, от них отделялись более мелкие озера и продолжали самостоятельное развитие.

**Пребореальный период.** По полученным данным можно заметить, что в обоих водоемах накопление терригенных отложений происходило в **пребореальное время**. В озере II, расположенном на более высокой абсолютной отметке 190 м, накапливались гомогенные алевриты, сменившиеся алевритами с незначительной примесью органики, а затем тонко-мелкозернистыми песками и в конце периода более крупнозернистыми песками. Такая градиционная литологическая последовательность предполагает постепенное снижение уровня водоема. Это подтверждается составом диатомового комплекса с доминированием типичных для начальных этапов заселения водоемов пионерных форм рода *Staurosira*. В озере I, лежащем на более низкой абс. отм. 141,5 м, в это время накапливались тонко-мелкозернистые пески. Диатомовый комплекс озера очень сходен, и в нем также доминировали пионерные формы рода *Staurosira*. Можно предположить, что водоем начал формироваться раньше на более высокой абсолютной отметке, чем на низкой. В пользу этого предположения говорит наличие в озере II небольшого количества галофильных форм (20–10 %), связанных с поступлением в водоем питательных веществ из первично расконсервированной морены. В обоих озерах доминантным формам сопутствовал набор почти одинаковых видов, тем самым подтверждая идентичность условий развития флоры. Некоторые различия связаны с геоморфологическими условиями.

Как упоминалось выше, озера образовались не ранее 9800 л. н. Вслед за отступающим ледником на изучаемую территорию проникли растения, способные произрастать на недавно освободившихся ото льда субстратах. Достаточно быстро сюда мигрировали пионерные древесные породы (*Betula pubescens*, *B. czerepanovii*), что и получило отражение в диаграммах донных отложений.

Согласно результатам спорово-пыльцевого анализа, в пребореале растительный покров был еще не полностью сомкнут. Об этом свидетельствует низкая насыщенность осадков пыльцой, довольно высокое значение плаунов, находки пыльцы можжевельника, предпочитающего супесчаные, песчаные почвы, обычно произрастающего на открытых местообита-

ниях и в разреженных лесах. На существование открытых местообитаний также указывает терригенный состав осадков, накопление которых было возможным лишь в условиях несомкнутого растительного покрова и наличия участков с не закрепленными растительностью грунтами. На территории исследования доминировало березовое редколесье, но существовали тундровые кустарничковые палеосообщества с ерикоидными кустарничками, карликовой березкой и ивой. Впоследствии, к концу пребореального периода леса становятся более сомкнутыми, в них увеличивается роль сосны, которая занимала возвышенные сухие местообитания. Интересно отметить, что в СПС пребореальных отложений озера I количество пыльцы *Ericales* составляет 9 %, а в СПС разреза озера II – 15–20 %. Таким образом, в растительном покрове территории, окружающей озеро II, роль тундровых кустарничковых сообществ была более значимой. Вероятно, это обусловлено геоморфологическими факторами: большая расчлененность рельефа мелкохолмистой моренной равнины по сравнению с озерно-ледниковой равниной создает более разнообразные условия при распределении тепла, влаги и питательных веществ. Влияние мезорельефа может быть сопоставимо с влиянием материнских пород на режим элементов питания [Липкина, 1987]. Следует отметить, что согласно опубликованным данным ряда исследователей в лесной зоне в разных регионах Европы область поступления пыльцы в озеро или болото небольших размеров (примерно 1 га) определена как расстояние 1,5–2,5 км от края водоема [по: Новенко и др., 2016]. Это в значительной степени относится к изученным озерам, расположенным на расстоянии 42 км друг от друга. Таким образом, СПС, сформировавшиеся в небольшом озере, дают возможность получить информацию о локальной растительности, непосредственно окружавшей исследуемые водоемы на фоне изменения климата, геоморфологических условий и литологического состава подстилающих пород.

**Бореальный период.** Анализ донных отложений озера I позволил выявить полный спектр изменений растительности и диатомовых комплексов на протяжении голоцена, в то время как реконструировать состав диатомовой флоры и последовательную смену фаз развития растительного покрова в окрестностях озера II не удалось вследствие перерыва в осадконакоплении в бореальное время. Об этом свидетельствует отчетливое и резкое изменение кривых основных компонентов СПС, совпадающее с четким контактом в литологии осадков.

Кроме того, диатомовая флора вышележащих сапропелей значительно отличается от таковой на предыдущем этапе. Полное исчезновение из спектра диатомовых видов рода *Staurosira* и вытеснение их на следующем этапе болотными формами рода *Eunotia* sp., *Pinnularia* sp. – явное тому подтверждение. Следовательно, можно предположить, что в месте отбора проб озеро было осушено из-за значительного падения его уровня. Снижение уровня фиксируется и в озере I по литологии осадков, по составу диатомового комплекса и по изменениям в СПС. В бореальное время в нем вначале накапливались сапропели с большим количеством неразложившихся растительных остатков. Минимальное содержание планктонных (2%) и обрастателей *Cymbella* sp., *Gomphonema* sp., *Tabellaria flocculosa*, которые вытесняются доминирующими донными видами родов *Pinnularia* sp., *Anomoeoneis* sp., *Frustulia saxonica*, является доказательством снижения глубины водоема, чему способствовал дефицит влажности, а также продолжавшийся гляциоизостатический подъем Фенноскандинавского щита. Это привело к снижению уровня грунтовых вод, что благоприятствовало быстрому распространению и почти полному господству сосновых лесов и нашло отражение в СПС донных отложений исследованных озер и на многих СПД Карелии и северо-запада России [Филимонова, 1995, 2014; Елина и др., 2000; Savelieva et al., 2019 и др.]. Кроме этого, экспансии сосновых лесов способствовали легкие по механическому составу и хорошо дренируемые песчаные почвы, широко распространенные на изучаемой территории. Понижение уровня водоемов наряду с потеплением климата привело к появлению хорошо прогреваемых мелководий, зараставших прибрежно-водными видами (*Sparganium*, *Polygonum amphibium*, видами семейства *Syrageaceae*). Отметим, что понижение уровня озер в рассматриваемый период зафиксировано в Европе и на северо-западе России [Сапелко и др., 2009; Субетто, 2009; Борисова, 2014 и др.], а также выявлено для большинства озер Карелии [Шелехова, 1993, 1995, 1996, 1998; Шелехова и др., 2004; Vasari et al., 2007; Шелехова, Лаврова, 2011].

**Атлантический период.** В это время в обоих водоемах накапливались сапропели с растительными остатками. Согласно данным спорово-пыльцевого анализа, состав пыльцы и спор в ПЗ, соответствующих атлантическому периоду, свидетельствует об изменении климата в сторону потепления и увеличения влажности. В СПС присутствует небольшое количество пыльцы термофильных пород. По-

явление такой пыльцы может быть объяснено продвижением к северу границ распространения этих видов. Отметим, что перенос пыльцы липы и дуба по воздуху происходит в пределах нескольких десятков километров [Мазей и др., 2018]. Интересно также, что в настоящее время в подзоне средней тайги встречаются куртины вяза и липняка ландышевые [Кузнецов, 1993]. Кроме этого, в водоемах, расположенных к северу от района исследований (например, Мянтулампи) [Экман и др., 1995], также идентифицирована пыльца термофильных пород. Вполне допустимо, что в благоприятных условиях оптимума голоцена отдельные термофильные породы могли проникать на исследуемую территорию и произрастать в подлеске ельников в депрессиях рельефа с проточным увлажнением, вдоль берегов водоемов. Скорее всего, первыми мигрантами могли быть вязы (*Ulmus laevis*, *U. scabra*), как более неприхотливые и морозоустойчивые, чем другие термофильные породы. Согласно полученным данным, растительный покров представлял собой сочетание сосновых и березово-сосновых лесов, к концу периода на территорию исследования началось вторжение темнохвойных пород. Необходимо подчеркнуть, что вследствие различной пыльцевой продуктивности и транспортабельности пыльцы доля пыльцы сосны и березы в спектрах завышена по отношению к участию этих пород в составе древостоя, а ели и широколиственных пород, напротив, занижена [Елина, 1981; Лийвранд, 1990 и др.]. На песчаных равнинах, вершинах холмов произрастали сосновые и сосново-березовые кустарничково-зеленомошные леса. Ель расселялась на благоприятных для нее местообитаниях на нижних частях склонов и у подножий возвышенностей. Возросшая теплообеспеченность привела к активному зарастанию хорошо прогреваемых мелководий прибрежно-водными и водными растениями, пыльца которых отмечается в спектрах обоих озер. Явным признаком потепления атлантического времени по диатомовому комплексу озера II является появление и повышение роли планктонных форм родов *Aulacoseira* sp., *Cyclotella* sp., *Nitzschia kuetzingiana*, увеличение разнообразия видов за счет новых форм родов *Amphora* sp., *Frustulia* sp., *Pinnularia* sp., *Stauroneis* sp., *Anomoeoneis* sp. В озере I признаки потепления и увлажнения атлантического периода отмечаются по повышению роли типичных болотных форм рода *Eunotia* sp., а также форм обрастаний *Staurosira* sp., усиленное развитие которых могло произойти во вновь затопленной прибрежной зоне, на хорошо прогреваемом мелководье. Полученные

радиоуглеродные датировки (табл. 2) подтверждают результаты микропалеонтологических исследований.

**В суббореальное время** в водоемах накапливались сапропели, содержащие неразложившиеся растительные остатки. В СПС палинозон наблюдается тенденция увеличения содержания пыльцы *Picea*, что, вероятно, является отражением экспансии ели, характерной для территории северо-запада [Елина и др., 2000; Savelieva et al., 2019 и др.]. Она формировала еловые и сосново-еловые леса, по берегам озер, ручьев встречались еловые сообщества, в подлеске которых могли принимать участие вяз, лещина, ольха черная. Травяной покров таких лесов был представлен влаголюбивым разнотравьем (*Filipendula ulmaria*, *Geum rivale*, растения семейства Cyperaceae, Poaceae, Polypodiaceae). Сосняки лишайниковые, зеленомошно-лишайниковые были распространены на озерно-ледниковой равнине, на верхних частях холмов и гряд. Увеличение вклада *Sphagnum* может указывать на активизацию процессов болотообразования в пределах изучаемой территории, в то же время синхронное возрастание количества пыльцы *Picea* и спор *Sphagnum* позволяет говорить о распространении ельников сфагновых. Согласно полученным данным, на территории, окружающей озеро II, еловые леса (скорее всего, сфагновые) занимали большие площади и имели более прочные позиции, чем в окрестностях озера I. По всей вероятности, это обусловлено геоморфологическими особенностями территории: еловые леса были приурочены в основном к более влажным нижним частям склонов холмов, межхолмовым понижениям с влажными почвами мелкохолмистой моренной равнины, а также к берегам водоемов, ручьев. Отсюда ель успешно проникала под полог сосняков, произрастающих на полого-волнистой ледниково-озерной равнине. Мелководья палеоводоемов продолжали зарастать водными и прибрежно-водными растениями (*Nuphar*, *Sparganium*, *Typha angustifolia*, *T. latifolia*, *Polygonum amphibium*, *Phragmites australis*, виды семейства Cyperaceae). Зафиксированы космополиты *Pediastrum boryanum* var. *boryanum*, *P. boryanum* var. *cornutum*. Диатомовый комплекс осадков суббореального времени в озере II отличается господством форм обрастаний *Eunotia* sp. и донных рода *Pinnularia* sp., указывая на дальнейшее заболачивание и низкий уровень. В сапропелях, соответствующих суббореальному времени и подтвержденных радиоуглеродной датировкой ( $3860 \pm 60$  С<sup>14</sup> ЛУ-9251,  $4280 \pm 90$  кал. л. н.), в озере I (рис. 3) створки

диатомовых отсутствуют. Это могло быть связано с его мелководностью из-за сухости климата, недостаточного поступления необходимой для вегетации диатомей кремнекислоты, кислорода и других питательных элементов.

**Субатлантический период** характеризовался дальнейшим похолоданием климата по отношению к предыдущим двум периодам. Это привело к смещению границы термофильных пород к югу и к гибели тех из них, которые, возможно, произрастали в подлеске еловых и сосновых лесов. Согласно выполненным реконструкциям на территории, окружающей озеро I, роль сосновых лесов более значима, чем в окрестностях озера II, где ель занимала большие площади, создавая монодоминантные ельники или сосново-еловые леса. Судя по некоторому увеличению вклада спор плаунов, леса становятся разреженнее, все более приближаясь по облику к северотаежным. Идентифицированная в отложениях пыльца *Droseraceae* указывает на заболачивание мелководий озер.

Об увеличении увлажненности климата в субатлантическое время и обводнении водоемов свидетельствуют доминирование в озере I форм обрастаний рода *Staurosira* sp., а также типичных болотных видов родов *Eunotia* sp., *Pinnularia* sp.; в озере II – существенное возрастание роли условно-планктонных форм *Tabelaria fenestrata* и вновь появление *Staurosira* sp.

## Выводы

1. Настоящими исследованиями установлены региональные и локальные особенности развития природной среды к западу от краевых образований стадии сальпаусселькя II. Согласно полученным данным, накопление вскрытых скважинами минеральных отложений (алевроитов, тонко-мелкозернистых песков) началось в пребореальное время, причем в озере II, скорее всего, эти процессы произошли несколько раньше – возможно, в начале пребореала, а в озере I – позднее, во второй его половине, когда уровень воды в водоемах снизился. В конце пребореала – начале бореала отмечается резкое падение уровней водоемов, характерное для всей Карелии и северо-запада европейской части России.
2. Установлены локальные особенности развития растительности вокруг водоемов, расположенных на разных абсолютных отметках и приуроченных к разным геолого-геоморфологическим условиям, которые зависели от характера рельефа, состава

подстилающих четвертичных отложений, то-поэдафических факторов. Растительность озерно-ледниковой равнины, сложенной тонко-мелкозернистыми песками, была представлена главным образом сосновыми лесами и не претерпевала существенных изменений начиная с бореального времени. В условиях мелкохолмистой моренной равнины создавались более разнообразные топоэдафические условия, которые были благоприятны для расселения ели. Активное распространение темнохвойных лесов началось с суббореального времени.

3. Установлено, что резкое снижение уровней водоемов в бореальное время связано не только с сухим климатом, но и с гляциоизостатическими процессами этого времени.
4. Подтверждается, что на начальных этапах развития водоемов их заселяли в основном мелкие диатомовые водоросли *Fragilaria sensu lato* (*Staurosira* spp., *Staurosirella* spp., *Pseudostaurosira* spp. и др.).
5. В «сухие» периоды (бореальный, суббореальный) при снижении уровней водоемов на освободившихся прибрежных территориях происходили процессы заболачивания, которые в диатомовых спектрах отражаются повышением содержания видов рода *Pinnularia* (в меньшей степени *Eunotia* sp.). Во «влажные» периоды (атлантический, субатлантический) при повышении уровней водоемов в более глубоких озерах доминируют планктонные формы, характерные для малых северных водоемов (*Aulacoseira* sp.) с незначительным присутствием *Cyclotella* sp., реже *Nitzschia kuetzingiana*. В мелководных водоемах увлажненность климата отражается в повышении роли эпифитов *Staurosira* и форм обрастаний *Eunotia* sp. (с достаточным участием донных *Pinnularia*). В субатлантическое время единично или в небольшом количестве появляются планктонно-литоральные *Tabellaria fenestrata*. Все эти признаки отмечались ранее для многих исследованных водоемов Карелии [Шелехова, 1998].
6. Начальные этапы развития водоемов характеризуются относительно более высокой минерализацией вод (пребореальный период) за счет поступления микроэлементов из свежерасконсервированных отложений. В дальнейшем на протяжении всего голоцена исследованные озера характеризуются низкой минерализацией вод и кислой средой.
7. Полученные результаты показывают, что накопление органических отложений на дан-

ной территории началось в бореальное время, но как минимум лет на 200–400 позже, чем в юго-западной Карелии.

Авторы благодарят коллег из ГГУП «СФ Минерал» за помощь в проведении полевых работ, а также Ю. С. Тихонову и Г. Н. Родионову за подготовку графических материалов.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН, АААА-А18-118020690231-1).

## Литература

- Баринова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с.
- Бобров А. Е., Куприянова Л. А., Литвинцева М. В., Тарасевич В. Ф. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1983. 208 с.
- Борисова О. К. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 2. С. 5–20. doi: 10.15356/0373-2444-2014-2-5-20
- Генкал С. И., Трифонова И. С. Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2009. 72 с.
- Генкал С. И., Чекрыжева Т. А. Центрические диатомовые водоросли (Bacillariophyta, Centrophyceae) водоемов Карелии // Биол. внутр. вод. 2011. № 1. С. 5–16.
- Генкал С. И., Куликовский М. С., Михеева Т. М., Кузнецова И. В., Лукьянова Е. В. Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. М.: Научный мир, 2013. 236 с.
- Генкал С. И., Чекрыжева Т. А., Комулайнен С. Ф. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии / Отв. ред. В. Г. Девяткин; ИБВВ РАН. М.: Научный мир, 2015. 202 с.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Демидов И. Н. Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 134–142.
- Демидов И. Н., Лукашов А. Д. Геоморфологические особенности территории // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия в приграничных с Финляндией районах Республики Карелия: опер.-информ. материалы / Ред. В. И. Крутов, А. Н. Громцев. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. С. 18–26.
- Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Л.: Географгиз, 1949. Кн. 1 – 240 с., кн. 2. – 288 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.

Елина Г. А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 159 с.

Елина Г. А., Лукашов А. Д., Юрковская Т. К. Позднеледниковье и голоцен Восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 242 с.

Елина Г. А., Лукашов А. Д., Токарев П. Н. Картографирование растительности и ландшафтов на временных срезах голоцена таежной зоны Восточной Фенноскандии. СПб.: Наука, 2005. 53 с.

Кузнецов О. Л. Дополнения к флоре зоологического заказника «Кижский» // Флора и фауна охраняемых природных территорий Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1993. Вып. 1. С. 143–150.

Куликовский М. С., Глушенко А. М., Генкал С. И., Кузнецова И. В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 171 с.

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Lamiaceae – Zygophyllaceae. Л.: Наука, 1978. 184 с.

Липкина Г. С. Почвообразование под лесом и на пашне в различных условиях рельефа // Почвоведение. 1987. № 3. С. 82–93.

Лийвранд Э. Методические проблемы палинostrатиграфии плейстоцена. Таллинн: Валгус, 1990. 176 с.

Лукашов А. Д. Рельеф и геоморфология // Интегрированный экологический мониторинг в Карелии (концепция, программа, методы, результаты 1992–1996). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. С. 21–24.

Лукашов А. Д. Геоморфологические условия. Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды / Ред. А. Н. Громцев, С. П. Китаев, В. И. Крутов, О. Л. Кузнецов и др. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2003. С. 13–19.

Новенко Е. Ю., Мироненко И. В., Волкова Е. М., Куприянов Д. А., Батанова А. К. Динамика ландшафтов юго-восточной Мещеры в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 2. С. 91–101.

Мазей Н. Г., Кусильман М. В., Новенко Е. Ю. Встречаемость пыльцы *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia* и *Quercus* в субрецентных спорово-пыльцевых спектрах Восточно-Европейской равнины: к вопросу о возможности дальнего заноса пыльцы // Экология. 2018. № 6. С. 431–439.

Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: АН СССР, 1951. Вып. 4. 619 с.

Пыльцевой анализ / Под ред. И. М. Покровской. М.: Госгеолгиздат, 1950. 571 с.

Сапелко Т. В., Лудикова А. В., Шумкин В. Я., Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А. Изменение природных обстановок южной части Кольского полуострова в поздне-последледниковье // Фундаментальные проблемы кватерна: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Матер. IV Всерос. совещания по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 2009. С. 534–537.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РПГУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

Филимонова Л. В. Стандартные спорово-пыльцевые диаграммы позднеледниковья и голоцена средней Карелии // Палинология в России. Статьи российских палинологов к IX Междунар. палинологическому конгрессу. М., 1995. С. 86–103.

Филимонова Л. В. История растительности в позднеледниковье и голоцене на территории заказника «Толвоярви» (Карелия) // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 2. С. 3–13.

Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.

Шелехова Т. С. Диатомовая флора озера Паанаярви в голоцене и ее современное состояние // Природа и экосистемы Паанаярвского национального парка. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1995. С. 44–54.

Шелехова Т. С. Эволюция малых озер охраняемых территорий Карелии (по данным диатомового анализа донных отложений): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1998. 26 с.

Шелехова Т. С. Этапы развития малых озер северо-западной Карелии в голоцене по данным диатомового анализа (на примере озер горы Нуорунен) // Вопросы геологии докембрия Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1993. С. 160–181.

Шелехова Т. С. История развития малого озера массива Луккулайсваара по данным диатомового анализа // Вопросы геологии Карело-Кольского региона. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1996. С. 128–140.

Шелехова Т. С. Четвертичные отложения и геоморфология Зеленого пояса Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 4. С. 41–50. doi: 10.17076/them1007

Шелехова Т. С., Васько О. В., Демидов И. Н. Развитие природной среды юго-западного Прионежья в голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 226–232.

Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Донные отложения озер Карелии: палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции // Геология Карелии от архея до наших дней: Матер. докладов Всерос. конференции, посвящ. 50-летию ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 204–212.

Экман И. М., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. История озера Мянтьюлампии в голоцене // Природа и экосистемы Паанаярвского национального парка. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1995. С. 54–70.

Экман И. М., Лукашов А. Д., Колканен А. М., Лийва А. А. Динамика развития озер и озерности Карельской АССР по данным радиохронологии (за последние 13 000–14 000 лет) // Изотопно-геохронологические исследования в Прибалтике и Белоруссии. Таллинн, 1988. 237 с.

Ekman I., Ijij V. Deglaciatio, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // Glacial deposits in North-East Europe / J. Ehlers, S. Kozarski and P. Gibbard (eds.). Rotterdam-Brookfield: A. A. Balkema, 1995. P. 195–209.

Grimm E. S. TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics program // 8<sup>th</sup> Int. Palynological Congress. Program and Abstracts. Aix-en-Provence, France, 1992. 56 p.

Heikkilä M., Fontana S. L., Seppä H. Rapid Lateglacial tree population dynamics and ecosystem changes in the eastern Baltic region // J. Quat. Sci. 2009. Vol. 24. P. 802–815.

Komárek J., Jankovská V. Review of green algal genus *Pediastrum*: implication for pollenanalytical research. Berlin, Stuttgart: Cramer J., 2001. 127 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süswasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

Lunkka J. P., Johansson P., Saarnisto M., Sallasmaa O. Glaciation of Finland // Quaternary Glaciations – Extent and Chronology / J. Ehlers, P. L. Gibbard (eds.). Elsevier, 2004. P. 93–100.

Molder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // Bull. Geol. Soc. Finland. 1967. Vol. 39. P. 199–217; 1968. Vol. 40. P. 151–170; 1969. Vol. 41. P. 235–251; 1970. Vol. 42. P. 129–144; 1971. Vol. 43. P. 203–220; 1972. Vol. 44. P. 141–149; 1973. Vol. 45. P. 159–179.

## References

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayushchei sredy [Diversity of algal indicators in the environmental assessment]. Tel-Aviv: PilliesStudio, 2006. 498 p.

Bobrov A. E., Kupriyanova L. A., Litvintseva M. V., Tarasevich V. F. Spory paprotnikoobraznykh i pyl'tsa golosemennykh i odnodol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Fern-shaped spores and pollen of gymnosperms and monocotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1983. 208 p.

Borisova O. K. Landshaftno-klimaticheskie izmeneniya v golotsene [Landscape and climate changes in the Holocene]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Proceed. RAS. Geographical Ser.]. 2014. No. 2. P. 5–20.

Davydova N. N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene [Diatoms as indicators of natural conditions of water bodies in the Holocene]. Leningrad: Nauka, 1985. 244 p.

Demidov I. N. Degradatsiya pozdnevaldaiskogo oledeneniya v basseine Onezhskogo ozera [Degradation of the Late Valdai glaciation in the basin of Lake Onega]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Useful Minerals of Karelia]. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 134–142.

Demidov I. N., Lukashov A. D. Geomorfologicheskie osobennosti territorii [Geomorphological features of the territory]. *Inventarizatsiya i izuch. biol. raznoobraziya v prigranichnykh s Finlyandiei raionakh Respubliki Kareliya: oper.-inform. mat.* [Inventory and study of biol. diversity in the regions of the Republic of Karelia bordering upon Finland: oper.-inform. mat.]. Eds. V. I. Krutov, A. N. Gromtsev. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998. P. 18–26.

Diatomovyi analiz. Opredelitel' iskopaemykh i sovremennykh diatomovykh vodoroslei [Diatom ana-

Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E. Pollen analysis. Second ed. London; Maiden; Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.

Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (eds.) Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000. Espoo: Geol. Surv. Finland, 1993.

Savelieva L. A., Andreev A. A., Gromig R., Subetto D. A., Fedorov G. B., Wennrich V., Wagner B., Melles M. Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record // *Boreas*. 2019. doi: 10.1111/bor.12376.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // *Geol. Surv. Finland Bull.* 1975. Vol. 274. P. 1–55; 1976. Vol. 284. P. 1–37; 1978. Vol. 296. P. 1–55; 1980. Vol. 312. P. 1–93.

Vasari Y., Kuznetsov O. L., Lavrova N. B., Shelekhova T. S., Vasari A. Alinlampi, a Late – Glacial site in the northern Karelian Republic // *Annales botanici Fennici*. 2007. Vol. 44. P. 42–55.

Поступила в редакцию 09.06.2020

lysis. A key to fossils and modern diatoms]. Leningrad: Geografiz, 1949. B. 1. 240 p.; B. 2. 288 p.

Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye) [Diatoms of the USSR (fossil and modern)]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1974. 403 p.

Ekman I. M., Lukashov A. D., Kolkanen A. M., Liiva A. A. Dinamika razvitiya ozer i ozernosti Karel'skoi ASSR po dannym radiokhronologii (za poslednie 13000–14000 let) [The dynamics of the development of lakes and lake percentage of the KASSR according to radio-chronology data (for the last 13000–14000 years)]. *Izotopno-geokhronol. issled. v Pribaltike i Belorussii* [Isotope-geochronol. studies in the Baltics and Belarus]. Tallinn, 1988. 237 p.

Elina G. A. Printsipy i metody rekonstruktsii i kartirovaniya rastitel'nosti golotsena [Principles and methods of reconstruction and mapping of the Holocene vegetation]. Leningrad: Nauka, 1981. 159 p.

Elina G. A., Lukashov A. D., Yurkovskaya T. K. Pozdnelednikov'e i golotsen Vostochnoi Fennoskandii (paleorastitel'nost' i paleogeografiya) [Glacial and Holocene of East Fennoscandia (paleovegetation and paleogeography)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. 242 p.

Elina G. A., Lukashov A. D., Tokarev P. N. Kartografirovaniye rastitel'nosti i landshaftov na vremennykh srezakh golotsena taezhnoi zony Vostochnoi Fenoskandii [Mapping of vegetation and landscapes on temporary sections of the Holocene of the taiga zone in Eastern Fennoscandia]. St. Petersburg: Nauka, 2005. 53 p.

Filimonova L. V. Standartnye sporovo-pyl'tsevye diagrammy pozdnelednikov'ya i golotsena srednei Karelii [Standard spore-pollen diagrams of Late Glacial and Holocene of middle Karelia]. *Palinologiya v Rossii. Stat'i ross. palinologov k IX Mezhdunar. palinologicheskomu kongressu* [Palynology in Russia. Proceed. Russ. pa-

lynologists, IX int. palynological congress]. Moscow, 1995. P. 86–103.

Filimonova L. V. Istoriya rastitel'nosti v pozdnelednikov'e i golotsene na territorii zakaznika "Tolvojarvi" (Kareliya) [History of vegetation in the Late Glacial and Holocene on the territory of the Tolvojarvi Nature Reserve (Karelia)]. *Trudy KarRC RAS* [Trans. KarRC RAS]. 2014. No. 2. P. 3–13.

Genkal S. I., Trifonova I. S. Diatomovye vodorosli planktona Ladozhskogo ozera i vodoemov ego basseina [Diatoms of plankton of Lake Ladoga and water bodies of its basin]. Rybinsk: Rybinskii Dom pečati, 2009. 72 p.

Genkal S. I., Chekryzheva T. A. Tsentricheskie diatomovye vodorosli (Bacillariophyta, Centrophyceae) vodoemov Karelii [Centric diatoms (Bacillariophyta, Centrophyceae) of water bodies of Karelia]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2011. No. 1. P. 5–16.

Genkal S. I., Kulikovskii M. S., Mikheeva T. M., Kuznetsova I. V., Luk'yanova E. V. Diatomovye vodorosli planktona reki Svisloch' i ee vodokhranilishch [Diatoms in plankton of the Svisloch River and its reservoirs]. Moscow: Nauchnyi mir, 2013. 236 p.

Genkal S. I., Kulikovskii M. S., Mikheeva T. M., Kuznetsova I. V., Luk'yanova E. V. Diatomovye vodorosli planktona reki Svisloch' i ee vodokhranilishch [Diatoms of plankton of the Svisloch River and its reservoirs]. Moscow: Nauchnyi mir, 2013. 236 p.

Genkal S. I., Chekryzheva T. A., Komulainen S. F. Diatomovye vodorosli vodoemov i vodotokov Karelii [Diatoms of water bodies and watercourses of Karelia]. Moscow: Nauchnyi mir, 2015. 202 p.

Khotinskii N. A. Golotsen Severnoi Evrazii [Holocene of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka, 1977. 200 p.

Kulikovskii M. S., Glushenko A. M., Genkal S. I., Kuznetsova I. V. Opredelitel' diatomovykh vodoroslei Rossii [A key to diatoms of Russia]. Yaroslavl': Filigran', 2016. 804 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa i spory rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Pollen and plant spores of the flora of the European part of the USSR]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 1972. 171 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa dvudol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR. Lamiaceae – Zygophyllaceae [Pollen of dicotyledonous plants of the flora of the European part of the SSSR. Lamiaceae – Zygophyllaceae]. Leningrad: Nauka, 1978. 184 p.

Kuznetsov O. L. Dopolneniya k flore zoologicheskogo zakaznika "Kizhskii" [Supplements to the flora of the Kizhi zoological reserve]. *Flora i fauna okhranyemykh prirod. territorii Karelii* [Flora and fauna of the protected nat. territories of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. Iss. 1. P. 143–150.

Lipkina G. S. Pochvoobrazovanie pod lesom i na pashne v razlichnykh usloviyakh rel'efa [Soil formation under the forest and on arable land in various terrain conditions]. *Pochvovedenie* [Soil Sci.]. 1987. No. 3. P. 82–93.

Liivrand E. Metodicheskie problemy palinostratigrafii pleistotsena [Methodological problems of the Pleistocene palynostratigraphy]. Tallinn: Valgus, 1990. 176 p.

Lukashov A. D. Rel'ef i geomorfologiya [Relief and geomorphology]. *Integrirrovannyi ekol. monitoring v Karelii (kontseptsiya, programma, metody, rezul'taty 1992–1996)* [Integrated environ. monitoring in Kare-

lia (concept, program, methods, results 1992–1996)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998. P. 21–24.

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

Mazei N. G., Kusic'man M. V., Novenko E. Yu. Vstrechaemost' pyl'tsy *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia* i *Quercus* v subretsentykh sporovo-pyl'tsevykh spektrakh Vostochno-Evropeiskoi ravniny: k voprosu o vozmozhnosti dal'nego zanosa pyl'tsy [Pollen occurrence of *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia* and *Quercus* in the sub-percent-age spore-pollen spectra of the East European Plain: on the question of the possibility of long-distance introduction of pollen]. *Ekol.* [Ecol.]. 2018. No. 6. P. 431–439.

Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (eds.) Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000. Espoo: Geol. Surv. of Finland, 1993.

Novenko E. Yu., Mironenko I. V., Volkova E. M., Kupriyanov D. A., Batanova A. K. Dinamika landshaftov yugo-vostochnoi Meshchery v golotsene [The dynamics of the landscapes of the southeastern Meshchera in the Holocene]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya* [Bull. MSU Ser. 5. Geography]. 2016. No. 2. P. 91–101.

Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR [Key to freshwater algae of the USSR]. Moscow; Leningrad: AN SSSR, 1951. Iss. 4. 619 p.

Pyl'tsevoi analiz [Pollen analysis]. Ed. I. M. Pokrovskaya. Moscow: Gosgeolizdat, 1950. 571 p.

Sapelko T. V., Ludikova A. V., Shumkin V. Ya., Kuznetsov D. D., Subetto D. A. Izmenenie prirodnykh obstanovok yuzhnoi chasti Kol'skogo poluoostrova v pozdne-poslelednikov'e [Changes in the natural conditions of the southern Kola Peninsula in the Late Postglacial]. *Fund. probl. kvatera: itogi izuch. i osnovnye napravleniya dal'neishikh issled.: Mat. IV Vseros. soveshch. po izuch. chetvertichnogo perioda* [Fund. probl. of the Quaternary, results and main trends of further studies: Proceed. IV All-Russ. conf. on Quaternary res.]. Novosibirsk, 2009. P. 534–537.

Shelekhova T. S. Diatomovaya flora ozera Paanajarvi v golotsene i ee sovremennoe sostoyanie [The diatom flora of Lake Paanajarvi in the Holocene and its current state]. *Priroda i ekosistemy Paanajarvskogo nats. parka* [Nat. and ecosystems of the Paanajarvi National Park]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1995. P. 44–54.

Shelekhova T. S. Evolyutsiya mal'nykh ozer okhranyaemykh territorii Karelii (po dannym diatomovogo analiza donnykh otlozhenii) [The evolution of small lakes in the protected areas of Karelia (according to the diatom analysis of bottom sediments)]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Peterburg, 1998. 26 p.

Shelekhova T. S. Etapy razvitiya mal'nykh ozer severo-zapadnoi Karelii v golotsene po dannym diatomovogo analiza (na primere ozer gory Nuorunen) [Stages of development of small lakes in northwestern Karelia in the Holocene according to diatom analysis (case of the lakes of Mount Nuorunen)]. *Vopr. geol. dokembriya Karelii* [Iss. of the Precambrian geol. in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. P. 160–181.

Shelekhova T. S. Istoriya razvitiya malogo ozera massiva Lukkulaysvaara po dannym diatomovogo analiza [The history of the development of a small lake

in the Lukkulaysvaara massif according to diatom analysis]. *Vopr. geol. Karelo-Kol'skogo regiona* [Geological iss. of the Karelia-Kola region]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1996. P. 128–140.

*Shelekhova T. S., Vas'ko O. V., Demidov I. N.* Razvitiye prirodnoi sredy yugo-zapadnogo Prionezh'ya v golotsene [The development of the natural environment of the south-western Onega in the Holocene]. *Geol. i poleznye isko-paemye Karelii* [Geol. and Useful Minerals of Karelia]. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 226–232.

*Shelekhova T. S., Lavrova N. B.* Donnye otlozheniya ozer Karelii: paleoekologicheskie i paleoklimaticheskie rekonstruktsii [Lake sediments in Karelia: palaeoecological and palaeoclimatic reconstructions]. *Geol. Karelii ot arkheya do nashikh dnei: Mat. dokl. Vseros. konf., posvyashch. 50-letiyu IG KarNTS RAN* [Geol. of Karelia from the Archean to the present day: Proceed. All-Russ. conf. dedicated. 50<sup>th</sup> anniv. IG KarRC RAS]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 204–212.

*Shelekhova T. S.* Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Zelenogo poyasa Fennoskandii [Quaternary sediments and geomorphology of the Green Belt of Fennoscandia]. *Trudy KarRC RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 4. P. 41–50. doi: 10.17076/them1007

*Shelekhova T. S., Ekman I. M., Lavrova N. B.* Istoriya ozera Myantyulampi v golotsene [History of the Mäntylampi Lake in the Holocene]. *Priroda i ekosistemy Paanajarvskogo nats. parka* [Nat. and ecosystems of the Paanajarvi National Park]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1995. P. 54–70.

*Subetto D. A.* Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstruction]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 339 p.

*Ekman I., Iljin V.* Deglaciatiya, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas. *J. Ehlers, S. Kozarski and P. Gibbard (eds.)*. Glacial deposits in North-East Europe Rotterdam-Brookfield: A. A. Balkema, 1995. P. 195–209.

*Grimm E. S.* TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics program. *8<sup>th</sup> Int. Palynological Congress. Program and Abstracts*. Aix-en-Provence, France, 1992. 56 p.

*Heikkilä M., Fontana S. L., Seppä H.* Rapid Lateglacial tree population dynamics and ecosystem changes in the eastern Baltic region. *J. Quat. Sci.* 2009. Vol. 24. P. 802–815.

*Komárek J., Jankovská V.* Review of green algal genus *Pediastrum*: implication for pollenanalytical research. Berlin, Stuttgart: Cramer J., 2001. 127 p.

*Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

*Lunkka J. P., Johansson P., Saarnisto M., Sallasmaa O.* Glaciation of Finland. *Ehlers J., Gibbard P. L. (eds.)*. Quaternary Glaciations – Extent and Chronology. Elsevier, 2004. P. 93–100.

*Molder K., Tynni R.* Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII. *Bull. Geol. Soc. Finland.* 39: 199–217(1967); 40: 151–170(1968); 41: 235–251(1969); 42: 129–144(1970); 43: 203–220(1971); 44: 141–149(1972); 45: 159–179(1973).

*Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E.* Pollen analysis. Second ed. London; Maiden; Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.

*Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (eds.)* Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000. Espoo: Geol. Surv. of Finland, 1993.

*Savelieva L. A., Andreev A. A., Gromig R., Subetto D. A., Fedorov G. B., Wennrich V., Wagner B., Melles M.* Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. *Boreas*. 2019. doi: 10.1111/bor.12376

*Tynni R.* Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI. *Geol. Surv. Finland Bull.* 274: 1–55(1975); 284: 1–37(1976); 296: 1–55(1978); 312: 1–93(1980).

*Vasari Y., Kuznetsov O. L., Lavrova N. B., Shelekhova T. S., Vasari A.* Alinlampi, a Late – Glacial site in the northern Karelian Republic. *Annales botanici Fennici*. 2007. Vol. 44. P. 42–55.

Received June 09, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Шелехова Татьяна Станиславовна

старший научный сотрудник лаб. геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, к. г. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: Shelekh@krc.karelia.ru

### Лаврова Надежда Борисовна

научный сотрудник, к. б. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: lavrova@krc.karelia.ru  
тел.: 89214545451

## CONTRIBUTORS:

### Shelekhova, Tatyana

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

### Lavrova, Nadezhda

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: lavrova@krc.karelia.ru  
tel.: +79214545451

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.551

### ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ БАЛАНСА МИНЕРАЛЬНОГО ФОСФОРА В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

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

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия*

На основе результатов расчета 55-летних изменений минерального фосфора в Можайском водохранилище рассматриваются особенности структуры его баланса в годовом аспекте и в период весеннего наполнения. Представлена схема процессов, моделируемых в имитационной модели, и общее расчетное уравнение концентраций минерального фосфора. Рассматриваемые составляющие баланса фосфатов включают поступление фосфора из донных отложений при возникновении условий аноксии в придонных слоях водохранилища, поступление фосфора в результате метаболизма фитопланктона, зоопланктона, рыб, поступление фосфора в результате минерализации растворенного органического вещества, сброс фосфора в нижний бьеф водохранилища, поступление фосфора в донные отложения в результате сорбции и соосаждения, потребление фосфора в процессе фотосинтеза фитопланктона. Установлено соотношение внешних и внутренних потоков минерального фосфора и выявлено доминирующее влияние поступления фосфатов с речным стоком на величину его аккумуляции в водохранилище. Проанализированы различия рассмотренных составляющих баланса фосфатов в отдельные фазы водного режима водохранилища. Выделены особенности колебаний запаса фосфатов и основных составляющих его баланса в период наполнения водохранилища. Величина максимальных запасов фосфатов колебалась в пределах 8,3–54,9 тонны при среднем значении 22,9 тонны. Линия тренда максимального содержания фосфатов весной с момента создания водохранилища по настоящее время имеет вид параболы, максимум которой приходится на конец 1990-х годов. Показано, что изменение запаса минерального фосфора в водохранилище контролируется последовательными изменениями его притока, седиментации и потребления фитопланктоном.

**Ключевые слова:** водохранилище; минеральный фосфор; седиментация; фитопланктон; баланс фосфора; половодье.

## **Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein. ESTIMATION OF THE MINERAL PHOSPHORUS BALANCE STRUCTURE IN THE MOZHAISK STORAGE RESERVOIR BASED ON THE RESULTS OF MODEL CALCULATIONS**

Based on the results of the calculation of 55-year-long changes in mineral phosphorus in the Mozhaisk storage reservoir, the structure of its balance over the annual cycle and during the spring refill are considered. The flowchart of the processes modeled in the simulation model and the general equation for calculating mineral phosphorus concentrations are presented. The components of the phosphate balance studied here are phosphorus influx from bottom sediments during anoxic conditions near the bottom, phosphorus influx resulting from the metabolism of phytoplankton, zooplankton and fish, phosphorus influx as a result of dissolved organic matter mineralization, phosphorus discharge to the reservoir's tailwaters, phosphorus intake in bottom sediments as a result of sorption and co-deposition, phosphorus consumption during phytoplankton photosynthesis. The ratio of external and internal mineral phosphorus flows was determined, and the dominant influence of phosphate inflow with river runoff on the amount of its accumulation in the reservoir was revealed. Variations of the above components of the phosphate balance across phases of the reservoir's water regime were analyzed. The patterns in the fluctuations of the phosphate stock and the main components of phosphorus balance during the refill period are highlighted. The maximum phosphate storage ranged from 8.3 to 54.9 tons, with an average at 22.9 tons. The trend line for the maximum content of phosphates in spring since the initial filling of the reservoir until now has the form of a parabola with the maximum in the late 1990s. It is shown that the change of the mineral phosphorus stock in the reservoir is controlled by serial changes in inflow, sedimentation and consumption by phytoplankton.

**Keywords:** storage reservoir; mineral phosphorus; sedimentation; phytoplankton; phosphorus balance; flood.

### **Введение**

В методологии гидрохимических исследований для оценки влияния водохранилищ на химический сток и формирование качества воды доминирует подход вещественных балансов, состоящий в сопоставлении приходных и расходных статей баланса химических веществ в годы разной водности [Эдельштейн, 1998]. Этот способ оценки весьма трудоемок из-за необходимости тщательного учета всех составляющих вещественного баланса экосистемы водоема, чего можно достигнуть лишь учащенными в пространстве и времени комплексными наблюдениями в течение всего гидрологического цикла [Моделирование..., 1995; Гидроэкологический..., 2015]. Соотношения составляющих баланса весьма изменчивы в зависимости от гидрометеорологических особенностей отдельных лет, поэтому многолетние обобщения структуры баланса позволяют выявить доминирующие процессы, определяющие величину запаса вещества в водоеме. Особенно важны такие балансы для биогенных веществ, поскольку их запас в водоеме является тем фоном, который определяет интенсивность продукционных процессов в вегетационный период. Из биогенных веществ в центре внимания лимнологов уже давно находится фосфор, кру-

говорот которого в большинстве пресноводных экосистем лимитирует первичную продукцию водоема и процесс эвтрофирования. В 1984 г. на Можайском водохранилище были проведены детальные наблюдения за режимом минерального фосфора и выполнен балансовый расчет фосфороудерживающей способности его экосистемы [Моделирование..., 1995].

Для расчета полного баланса вещества, составляемого с учетом внутриводоемных процессов, необходимы количественные оценки потоков химических веществ, возникающих непосредственно в водной массе водохранилища в течение времени ее пребывания в водоеме. При невозможности достоверно оценить интенсивность этих потоков в природных условиях используются расчеты по гидроэкологическим моделям, воспроизводящим особенности внутриводоемного круговорота веществ и продукционных процессов в экосистеме водоема. В этом случае появляется возможность увеличить длительность анализируемых рядов составляющих фосфорного баланса.

### **Материалы и методы**

Для анализа многолетних особенностей режима фосфора и основных гидрологических факторов, его определяющих, исполь-

зована математическая двумерная боксовая гидроэкологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ.

Опыт применения этой модели для расчетов гидрологического режима различных водохранилищ Московского региона за отдельные годы показал вполне удовлетворительные результаты при условии тщательной подготовки (проверки на репрезентативность и достоверность) необходимых для расчетов исходных данных [Эдельштейн и др., 2005; Даценко и др., 2011].

Алгоритм модели представляет собой термогидродинамическую основу для расчетов режима гидрохимических и гидробиологических характеристик состава воды в водохранилище, концентрации которых изменяются под влиянием комплекса физико-химических, химических и биохимических процессов. Внутриводоёмные изменения характеристик качества воды рассчитываются в экологическом блоке модели после того, как выполнены расчеты их изменений процессами внешнего и внутреннего водообмена. Расчет характеристик состава воды и биоты производится по уравнениям баланса массы в соответствии с концептуальными схемами взаимосвязей этих компонентов водной экосистемы [CE-QUAL-R1..., 1986]. Структура

модели и верификация выполненных по ней гидроэкологических диагностических расчетов детально изложена в монографии [Гидроэкологический..., 2015].

Эмпирические параметры, используемые в этой модели и не являющиеся универсальными, заимствованы из работы [CE-QUAL-R1..., 1986], в которой приводятся диапазоны изменчивости необходимых для выполнения расчетов параметров и рекомендованные значения. Эти значения в дальнейшем корректировались по результатам гидролого-гидрохимических съемок москворецких водохранилищ. Наиболее полная валидация модели была выполнена по материалам учащенных наблюдений за пространственно-временным распределением фосфатов на Можайском и Учинском водохранилищах. По данным съемок Можайского водохранилища, значения Тила колебались по сезонам года в диапазоне 0,18–0,39, а по различным участкам водохранилища – 0,25–0,38, соответствуя удовлетворительной оценке результатов моделирования [Даценко и др., 2012]

Схема процессов, учитываемых в расчете концентрации реактивного (потребляемого растениями) растворенного минерального фосфора (РМФ), представлена на рис. 1.

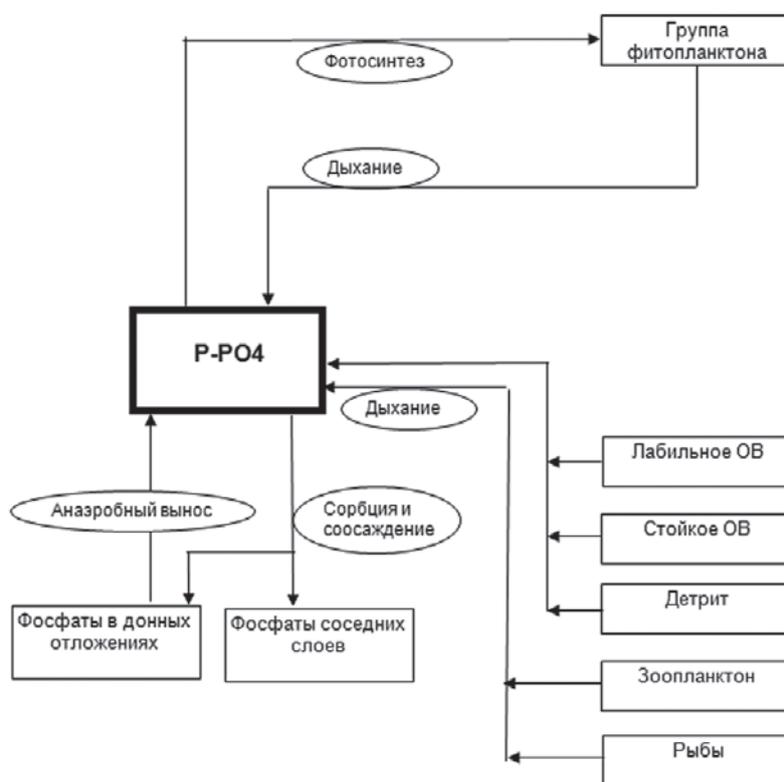


Рис. 1. Схема процессов при расчете режима фосфатов в модели ГМВ-МГУ

Fig. 1. Process flow diagram for calculating the phosphate regime in the GMV-MSU model

Общее уравнение баланса массы фосфатов имеет вид:

$$\frac{dC_P}{dt} = (K_{ar} - K_{ag}) \cdot \delta_P \cdot B_a + K_D \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_D + K_{DOM} \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_{DOM} + K_{RFR} \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_{RFR} + K_Z \cdot B_Z \cdot \delta_P + K_F \cdot B_F \cdot \delta_P + S_{od} \cdot F_d / V - \frac{P_P (\omega_{ss} \cdot C_{ss} + \omega_D \cdot C_D + \omega_{Fe} \cdot C_{Fe} + \omega_{Mn} \cdot C_{Mn}) \cdot C_P}{\Delta z},$$

где  $C_P$  – концентрация фосфатов, мг P/л;  $\delta_P = 0,004$  – стехиометрический коэффициент фосфора;  $B_a, B_Z, B_F$  – биомасса фитопланктона, зоопланктона, рыб, мг/л;  $K_{ag}$  – скорость роста фитопланктона, 1/сут;  $K_{ar}, K_Z, K_F, K_D, K_{DOM}, K_{RFR}$  – скорость выделения фосфатов в результате дыхания фитопланктона, зоопланктона, рыб и разложения детрита, лабильного органического вещества, стойкого органического вещества, 1/сут;  $\gamma_{om}$  – температурный коэффициент для процессов разложения органического вещества и детрита;  $S_{od} = 0,021$  – скорость выноса фосфатов из донных отложений в анаэробных условиях, г P/(м<sup>2</sup> сут);  $F_d$  – площадь донных отложений в пределах расчетного бокса, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем бокса, м<sup>3</sup>;  $\omega_{ss} = 0,1, \omega_D = 0,35, \omega_{Fe} = 0,34, \omega_{Mn} = 0,34$  – скорость осаждения неорганических взвесей, детрита, нерастворимых соединений железа и марганца, м/сут;  $C_{ss}, C_D, C_{Fe}, C_{Mn}, C_{DOM}, C_{RFR}$  – концентрация неорганических взвесей, детрита, окисленного железа, четырехвалентного марганца, лабильного органического вещества, стойкого органического вещества соответственно, мг/л;  $P_P = 35$  – коэффициент адсорбции, м<sup>3</sup>/г;  $\Delta z$  – толщина расчетного бокса, м.

Расчеты концентраций фосфатов проводились для Можайского водохранилища – типич-

ного долинного водохранилища, осуществляющего многолетнее регулирование стока верхнего участка р. Москвы. Балансы минерального фосфора рассчитаны за 55 лет (1961–2015) эксплуатации этого водохранилища.

## Результаты и обсуждение

В соответствии с концептуальной схемой круговорота РМФ в модели последовательно рассчитывались следующие составляющие внешнего и внутреннего баланса РМФ:

- поступление фосфора в водоем с речными водами, боковым притоком, перекачкой из Колоцкого водохранилища,
- поступление фосфора из донных отложений при возникновении условий аноксии в придонных слоях водохранилища,
- поступление фосфора в результате метаболизма фитопланктона, зоопланктона, рыб,
- поступление фосфора в результате минерализации растворенного органического вещества,
- сброс фосфора в нижний бьеф водохранилища,
- поступление фосфора в донные отложения в результате сорбции и соосаждения,
- потребление фосфора в процессе фотосинтеза фитопланктона.

Расчитанные (в тоннах) ежесуточные потоки этих составляющих баланса для всего водохранилища суммировались, и определялись годовые балансы минерального фосфора за весь период расчета. Осредненные за многолетний период значения составляющих фосфорного баланса Можайского водохранилища представлены на рис. 2.

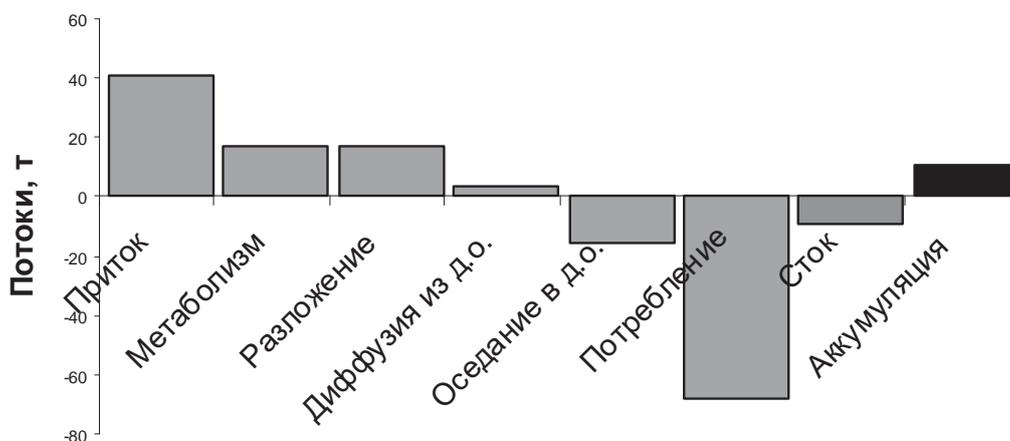


Рис. 2. Среднемноголетние потоки составляющих баланса минерального фосфора в Можайском водохранилище по данным модельных расчетов

Fig. 2. Average annual flows of mineral phosphorus balance components in the Mozhaisk storage reservoir according to model calculations

Рассматриваемые составляющие фосфорного баланса можно разделить на внешние (приток и сброс из водохранилища) и внутренние, потоки которых связаны с процессами метаболизма водных организмов и обменными процессами на границе донных отложений.

В приходной части внешнего баланса РМФ преобладает приток с речными водами, значительно превышающий сброс фосфора в нижний бьеф. Межгодовые колебания речного притока РМФ изменяются в диапазоне 20–100 т и зависят от гидрометеорологических условий года. Наименьшими значениями в приходной части баланса характеризуется поступление РМФ в результате его диффузии из донных отложений. Низкие значения этого потока обусловлены особенностями модельного расчета этой составляющей баланса фосфора. Поток создается только при возникновении аноксии в придонных слоях водохранилища. Аноксия в придонных слоях в Можайском водохранилище в периоды стагнации в последние десятилетия наблюдается ежегодно, при этом объемы зон с отсутствием растворенного кислорода в различные сезоны и годы колеблются в зависимости от условий вертикального перемешивания и интенсивности потребления кислорода в придонных слоях. Однако аноксия, возникающая летом обычно в середине июля, наблюдается в нижней его части на больших глубинах. Площадь дна под бескислородными слоями по сравнению со всей площадью водоема сравнительно невелика, и общий для водохранилища поток РМФ из донных отложений оказывается небольшим. Кроме того, этот поток, по расчетам, существует относительно непродолжительное время, поэтому суммарный годовой вклад диффузии РМФ из донных отложений в баланс фосфора характеризуется невысокими значениями. Следует заметить, что при отсутствии модельного расчета потока фосфора в результате взмучивания роль составляющей баланса фосфора, связанной с влиянием донных отложений, может уменьшаться. Поток РМФ в донные отложения определяется сорбцией этой формы фосфора на взвешях и нерастворимых соединениях железа и марганца с последующим осаждением и намного превышает его диффузию из донных отложений. Эта расходная составляющая баланса в среднемноголетнем аспекте существенно превышает сброс РМФ в нижний бьеф.

Во внутренних потоках фосфора, связанных с жизнедеятельностью водных организмов, доминирует потребление РМФ на развитие фитопланктона. Часть потребленного фосфора возвращается в воду в процессе дыхания

и экскреции организмов, часть – в результате разложения детрита и аллохтонного органического вещества, и эти два потока соизмеримы по величине. Превышение величины потребления РМФ над суммой потоков выделения и разложения объясняется тем, что некоторая часть потребленного фосфора поступает в донные отложения и аккумулируется в водохранилище в результате осаждения фитопланктона и детрита. Так как скорости процессов метаболизма очень высоки (по оценкам, приведенным в специальной литературе, полный круговорот РМФ в водоемах происходит в течение нескольких минут), роль внешних потоков фосфора проявляется в основном в формировании некоторого фоновый уровня концентраций РМФ, определяющего продукционные процессы. Колебания величин внутренних обменных потоков РМФ определяются зависящей от погодных условий интенсивностью продукционных процессов и характеризуются изменчивостью, близкой к изменчивости величин поступления фосфора с речным притоком.

Среднемноголетнее значение результирующей величины рассчитанных потоков РМФ, названной нами аккумуляцией, в Можайском водохранилище составила 26 % от величины его притока. Анализ факторов ежегодных величин аккумуляции показал, что наиболее значимое воздействие на эту величину оказывает величина годового притока фосфора (рис. 3).

Этот фактор уже учитывался ранее при расчете величины удержания фосфора в водохранилищах [Даценко, 2007].

Влияние гидрометеорологических особенностей отчетливо проявляется в изменении структуры и соотношения балансовых составляющих РМФ в отдельные фазы гидрологического режима водохранилища. Поэтому по многолетним данным были проанализированы различия рассмотренных составляющих баланса РМФ в отдельные фазы режима водохранилища. По многолетним данным характеристик водного баланса в каждый год выделялись следующие фазы: зимние паводки, зимняя межень, подъем половодья, спад половодья, летне-осенние паводки, летне-осенняя межень.

Внутренние потоки РМФ, связанные с обменными процессами и играющие столь значительную роль в годовом балансе фосфора, проявляются только в вегетационный период, с периода фазы спада половодья, когда в водохранилище начинается цветение диатомовых водорослей. Общая результирующая баланса РМФ (аккумуляция) достигает максимальных положительных значений в половодье, осо-

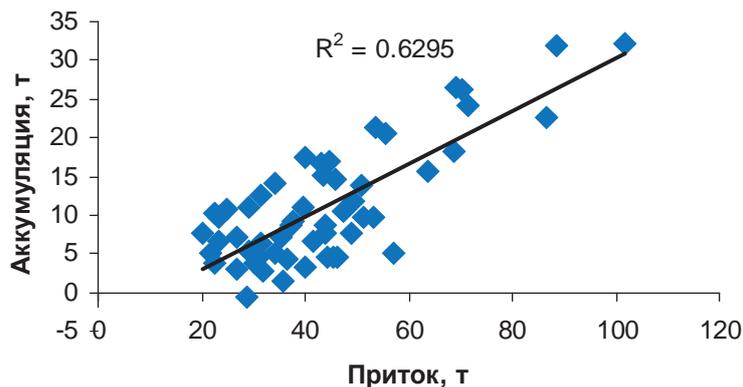


Рис. 3. Зависимость величины годовой аккумуляции РМФ от величины притока фосфора с речными водами

Fig. 3. Dependence of the annual accumulation of RMP on the amount of phosphorus inflow from river waters

бенно в фазу подъема, а в меженную фазу при небольшом притоке она становится даже отрицательной за счет седиментации. Незначительно колеблется по фазам величина диффузии из донных отложений, максимальная в период летней межени, и седиментация, закономерно повышающаяся в периоды подъема водного притока – в половодье и паводки.

Для формирования запаса минерального фосфора в водохранилище в предвегетационный период важнейшее значение имеет баланс фосфора в весенний период при наполнении водохранилища. В весенний период простран-

ственно-временные особенности распределения биогенных веществ в водоеме определяются сложным сочетанием гидрологических условий развития половодья и режима работы гидроузла при наполнении водохранилища.

Анализ многолетних рядов балансовых составляющих в весенний период показал, что в режиме фосфатов можно выделить несколько фаз: 1 – фаза интенсивного роста запасов; 2 – фаза их интенсивного снижения и 3 – фаза весенней стабилизации запасов. В таблице представлена структура баланса фосфатов в выделенные фазы.

Структура баланса фосфатов Можайского водохранилища за отдельные фазы весны

Structure of the Mozhaisk reservoir phosphate balance for individual spring phases

Период Period	Ед. измерения Units	Приход Inflow							Расход Outflow			
		Аккумуляция Accumulation	Приток с водосбора Inflow from the catchment	Жизнедеятельность фитопланктона Phytoplankton life	Жизнедеятельность зоопланктона Zooplankton life	Разложение органического вещества Decomposition of organic matter	Разложение детрита Detritus decomposition	Поступление из грунтов дна Inflow from bottom soils	Аккумуляция в береговой зоне Accumulation in the coastal zone	Сброс в нижний бьеф Outflow to the canal round	Седиментация Sedimentation	Производство фитопланктона Phytoplankton production
Фаза 1 Phase 1	тонн tons	20,2	22,6	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	-0,9	-1,0	-1,2	0,0
	%		97,7	0,0	0,2	1,4	0,0	0,7	29,4	27,2	41,7	1,7
Фаза 2 Phase 2	тонн tons	-17,1	3,8	4,5	0,1	0,9	0,0	0,0	-0,2	-2,6	-3,0	-16,1
	%		35,8	53,0	0,9	9,9	0,1	0,2	0,9	10,7	14,7	73,6
Фаза 3 Phase 3	тонн tons	-4,8	1,9	6,7	1,2	2,1	0,1	0,0	0,0	-0,8	-2,5	-11,0
	%		13,4	55,7	10,0	19,9	0,5	0,5	0,1	5,4	19,1	75,5

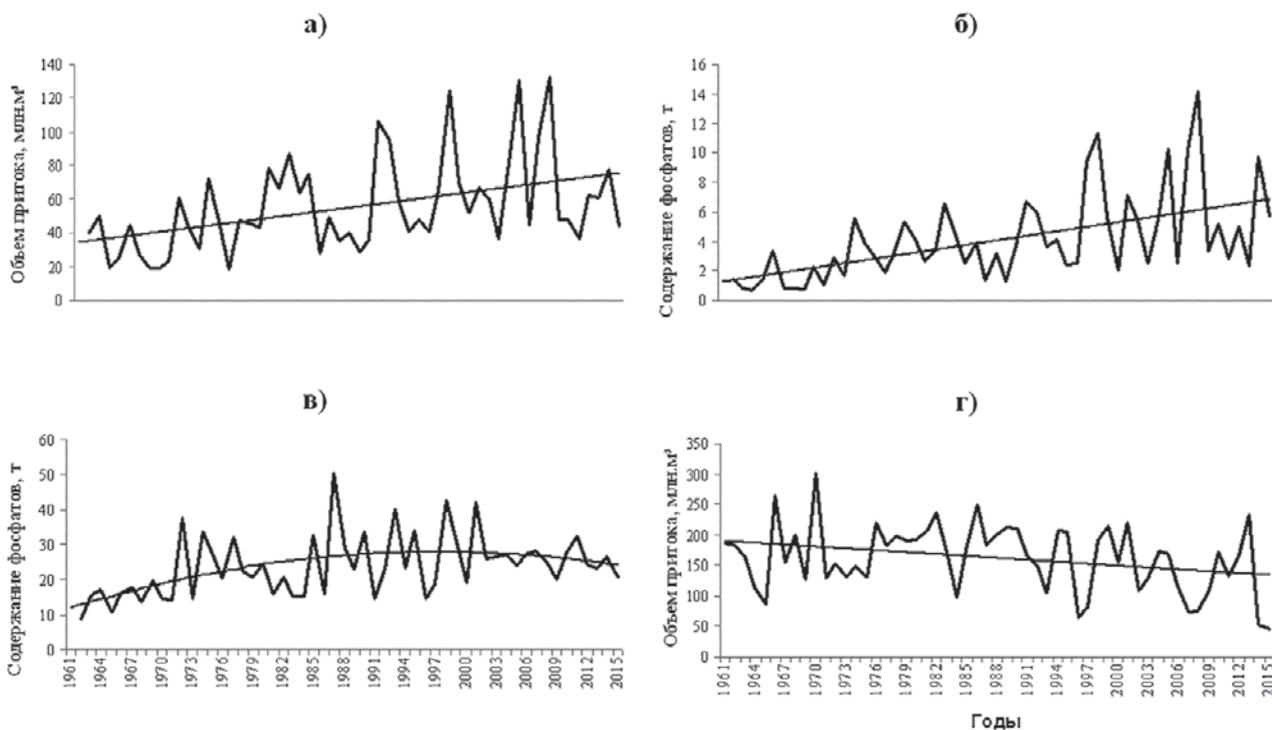


Рис. 4. Многолетняя изменчивость притока воды за зиму (а), притока воды за весеннее половодье (г), содержания фосфатов в конце зимы (б) и их максимального содержания в весенний период (в)

Fig. 4. Long-term variability of water inflow during the winter (а), water inflow during the spring flood (г), the content of phosphates at the end of winter (б) and their maximum content in the spring (в)

Разнообразие режимов наполнения водохранилища и гидрометеорологических процессов приводит к большой изменчивости режима запасов фосфатов в весенний период.

Перед началом весеннего наполнения в водохранилище обычно наблюдаются минимальные запасы воды и фосфатов. В целом за прошедшие 55 лет отмечается хорошо выраженный положительный линейный тренд объема зимнего притока воды (рис. 4, а), который показывает, что за это время зимний приток воды в водохранилище увеличился более чем в 2 раза (в среднем с 33,7 до 75,6 млн м<sup>3</sup>). Аналогичный тренд выявлен и для содержания фосфатов перед началом весеннего наполнения водоема (рис. 4, б), где наблюдается пятикратный рост содержания фосфатов (с 1,2 до 6,8 тонны). Количество фосфатов в водоеме в конце зимы тесно связано с объемом зимнего притока (коэффициент корреляции 0,826). Чем больше зимний приток воды, тем выше запасы фосфат-иона в водохранилище перед началом его весеннего наполнения. Обычно это бывает связано с мягкой зимой – корреляционное отношение объема зимнего притока со средней температурой воздуха в зимний период  $r = 0,563$ . Имеет место также отрицательная корреляционная связь между длительно-

стью зимы и запасами минерального фосфора в конце зимнего периода ( $r = -0,260$ ), т. е. чем больше длительность зимы, тем меньше конечный зимний запас фосфора в водоеме, что связано с большей сработкой водохранилища.

С приходом речных вод половодья запасы фосфатов быстро пополняются (фаза 1 – интенсивный рост запасов), достигая своего максимума в среднем спустя неделю после прохождения пика половодья на реках водосборного бассейна. Однако при длительном подъеме половодья (холодная весна) максимум фосфатов в водоеме может сформироваться и до достижения пика половодья. И напротив, быстрый подъем половодья при последующем его медленном спаде приводит к тому, что максимум запаса фосфатов в водоеме может наступить на 2–3 недели позже прохождения пика половодья на реках. Изменчивость отклонения даты наступления максимума запасов фосфора в водохранилище от даты пика половодья очень высокая ( $C_v = 0,86$ ).

В приходной части баланса фосфатов в это время доминирует (98 %) их поступление с речным притоком, в расходной части – седиментация фосфатов с минеральной взвесью (42 %, табл.).

В среднем максимум содержания фосфат-иона в водохранилище приходится на 18 апре-

ля. Диапазон изменения этой даты 22 марта – 9 мая. Величины максимальных запасов фосфатов колебались в пределах 8,3–54,9 тонны при среднем значении (50 % обеспеченности) 22,9 тонны и изменчивости ряда 38 %. Линия тренда максимального содержания фосфатов весной с момента создания водохранилища по настоящее время имеет вид параболы ( $R^2 = 0,234$ ), максимум которой приходится на конец 90-х годов (рис. 4, в). Корреляция максимального содержания фосфатов с уровнем воды в водохранилище невысокая ( $r = 0,284$ ), из чего следует, что наполненность водохранилища не является главным фактором весеннего накопления фосфатов в водоеме.

Изменение объема весеннего половодья с момента создания водохранилища по настоящее время имеет слабо выраженный отрицательный линейный тренд (рис. 4, г). Значимая корреляция объема половодья и максимальных запасов фосфора отсутствует ( $r = 0,031$ ), т. е. объем половодья практически не влияет на максимальную величину весенних запасов фосфатов в водохранилище. Однако значимая корреляционная связь отмечена между максимальными запасами минерального фосфора и длительностью их накопления ( $r = 0,472$ ). Следовательно, чем выше температура воздуха в начале весны и чем интенсивнее подъем половодья на реках водосбора, тем меньше в водоем поступает фосфатов с его водосбора. Скорее всего, это связано с тем, что при интенсивном развитии весенних процессов в реки поступает в основном поверхностный склоновый сток, содержание фосфатов в котором существенно меньше, чем в почвенном стоке завершающей фазы весны.

Максимум содержания фосфатов в водохранилище наступает, как правило, раньше момента его максимального весеннего наполнения (в среднем на 13 суток) при уровне воды в среднем на 64 см ниже максимального, т. е. снижение запаса фосфатов начинает происходить еще при продолжающемся заполнении водохранилища. На первом этапе это снижение (фаза 2 – интенсивное снижение запасов) происходит прежде всего в результате того, что поступление фосфатов с притоком рек начинает уступать процессам седиментации минеральной взвеси с адсорбированными на ней фосфатами. В ряде случаев (16 из 55 лет) к этому приводит увеличение сбросов воды в нижний бьеф водохранилища при ожидании большого притока воды с водосбора. Но наиболее сильное влияние на интенсивность уменьшения запасов фосфора оказывают активно потребляющие их весенние виды диатомовых водорослей,

развитие которых в это время в значительной степени контролируется температурным фактором. Пик весеннего развития фитопланктона приходится в среднем на 5 мая (что на 17 дней позже пика содержания фосфатов в водоеме) при диапазоне изменения 12 апреля – 30 мая и коэффициенте вариации  $C_v = 8$  %. Коэффициент корреляции весеннего максимума биомассы ФП с максимумом содержания фосфора в водоеме весной очень высок и составляет  $r = 0,799$ .

В структуре баланса фосфатов в этот период происходят существенные изменения (табл.). В приходной части баланса практически в 3 раза снижается роль речного притока (с 98 до 36 %), на порядок возрастает роль разложения органического вещества. Доминирующим фактором пополнения запасов фосфора в водоеме становятся процессы жизнедеятельности фитопланктона (53 %). В то же время на рост биомассы фитопланктона приходится 74 % расходной части баланса фосфатов, а вклад седиментации и сработки водохранилища в снижение запасов фосфатов уменьшается почти в 3 раза.

После достижения максимума биомассы весеннего фитопланктона и начала его отмирания скорость снижения запасов фосфатов существенно замедляется (фаза 3 – стабилизация запасов). В гидрологическом режиме водохранилища этот период обычно характеризуется стабилизацией уровня воды на период нереста основных видов рыб водоема, поэтому в расходной части баланса фосфатов роль сбросов воды из водохранилища минимальна. Доминирует по-прежнему потребление фосфора на продукционные процессы (75 %) и седиментация фосфора, адсорбированного на взвешенных частицах (19 %). Роль речного притока, как и сбросов воды из водохранилища, в эту фазу минимальна, в приходной части баланса фосфора по-прежнему максимален вклад процессов жизнедеятельности фитопланктона (56 %), в 2 раза, до 20 %, возрастает вклад разложения органического вещества. Характерной особенностью этого периода является резкое возрастание в балансе фосфатов вклада процессов жизнедеятельности зоопланктона (с 1 до 10 %).

Весенний период в гидрологическом режиме водоема заканчивается, по существу, после пика фазы «чистой воды», которая совпадает с минимумом весенней биомассы фитопланктона. В Можайском водохранилище этот пик приходится в среднем на 1 июня при диапазоне изменения этой даты 11 мая – 22 июня и коэффициенте вариации  $C_v = 7$  %. При этом корреля-

ляционная зависимость весеннего минимума биомассы фитопланктона от максимального содержания фосфатов в водоеме невысока ( $r = 0,390$ ).

## Заключение

Анализ полученных моделированием многолетних рядов запасов и составляющих баланса фосфатов в Можайском водохранилище позволил установить основные черты режима фосфатов. В среднемноголетнем аспекте в приходной части баланса доминирует приток фосфатов с речным стоком, в расходной – потребление их фитопланктоном. Соотношение составляющих баланса заметно изменяется в различные фазы гидрологического режима водохранилища.

Изменение запасов минерального фосфора в период заполнения водохранилища водами половодья характеризуется наличием фазы подъема, в которой доминирующую роль играет поступление фосфатов в водохранилище с водами притока, и фазы спада. Главной причиной снижения запасов фосфатов в начальной стадии спада становится седиментация сорбированных на взвешах фосфатов, а затем начинает доминировать поглощение фосфатов диатомовыми водорослями. Начало интенсивного поглощения фосфатов фитопланктоном определяется температурным режимом водохранилища в период его наполнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-01066).

## References

Datsenko Yu. S., Erina O. N., Puklakov V. V. Modelirovanie rezhima fosfora v stratifitsirovannom vodokhranilishche [Modeling the phosphorus regime in a stratified reservoir]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutr. vodoemakh i morskikh vodakh: Mat. V Seros. simp. s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sent. 2012 g.)* [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and marine waters: Proceed. V All-Russ. symp. with int. part. (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012)]. Petrozavodsk, 2012. P. 379–382.

Datsenko Yu. S. Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty [Reservoirs eutrophication. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow: GEOS, 2007. 252 p.

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V., Ershova M. G., Edel'shtein K. K. Ispol'zovanie gidrologicheskoi modeli dlya vosproizvedeniya ekologicheskogo sostoyaniya vodokhranilishch [Using a hydrological model to reproduce the ecological state of reservoirs]. *Resursy i kachestvo vod sushi: otsenka, prognoz i upravlenie* [Resour-

## Литература

*Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз)* // Под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.

Даценко Ю. С., Ерина О. Н., Пуклаков В. В. Моделирование режима фосфора в стратифицированном водохранилище // *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Матер. V Всерос. симп. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.)*. Петрозаводск, 2012. С. 379–382.

Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., Ершова М. Г., Эдельштейн К. К. Использование гидрологической модели для воспроизведения экологического состояния водохранилищ // *Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление*. М.: ИВП РАН, 2011. С. 82–97.

Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: GEOS, 2007. 252 с.

*Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище* / Под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 80 с.

Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: GEOS, 1998. 277 с.

Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Экспериментальная оценка погрешности модельного расчета стратификации водной толщи в водохранилище // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2005. № 6. С. 20–24.

*CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User's manual. Instruction Report E-82-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station Environ. Laboratory, Vicksburg, Miss., 1986. 508 p.*

Поступила в редакцию 03.03.2020

ces and terrestrial water quality: assessment, forecast, and management]. Moscow: IVP RAN, 2011. P. 82–97.

Edel'shtein K. K., Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Eksperimental'naya otsenka pogreshnosti model'nogo rascheta stratifikatsii vodnoi tolshchi v vodokhranilishche [Experimental assessment of the model error calculation of water stratification in a reservoir]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya* [MSU Bull. Ser. 5. Geography]. 2005. No. 6. P. 20–24.

Edel'shtein K. K. Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya [Reservoirs of Russia: ecological problems and ways to solve them]. Moscow: GEOS, 1998. 277 p.

*Gidroekologicheskii rezhim vodokhranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz)* [Hydroecological regime of the Moscow region reservoirs (observations, diagnostic, and forecast)]. Ed. K. K. Edelshtein. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

*Modelirovanie rezhima fosfora v dolinnom vodokhranilishche* [Modeling the phosphorus regime in valley re-

servoires]. Ed. K. K. Edel'shtein. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1995. 80 p.

*CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality*; User's manual. Instruction Re-

port E-82-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station Environ. Laboratory, Vicksburg, Miss., 1986. 508 p.

*Received March 03, 2020*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

### **Даценко Юрий Сергеевич**

профессор каф. гидрологии суши географического факультета, старший научный сотрудник, д. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991  
эл. почта: yuri0548@mail.ru  
тел.: (495) 9395470

### **Пуклаков Валерий Владимирович**

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

### **Эдельштейн Константин Константинович**

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

## **CONTRIBUTORS:**

### **Datsenko, Yuri**

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

### **Puklakov, Valery**

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

### **Edelstein, Konstantin**

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

## ХРОНИКА

### **VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ (ШКОЛА-ПРАКТИКА) «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ» (Петрозаводск, 1–5 сентября 2020 г.)**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) организовал и с 1 по 5 сентября 2020 г. провел в г. Петрозаводске VI Международную конференцию молодых ученых (школу-практику) «Водные ресурсы: изучение и управление». Это мероприятие является продолжением целенаправленной деятельности института по подготовке талантливой молодежи для работы в сфере науки и высшего образования и проходит регулярно с 2007 г.

- В 2010 году состоялась I Международная экспедиционная школа-практика «Великие озера Европы – озеро Онежское», которая показала актуальность применения интерактивных методов обмена информацией в практических полевых условиях.
- В 2012 году II Международная экспедиционная школа-практика «Великие озера Европы – озеро Онежское» проведена в тесном сотрудничестве с отечественными и зарубежными учреждениями высшего образования и научными институтами, и с тех пор эта форма работы стала регулярной.
- В 2013 году прошел III Международный семинар «Трансграничные водосборы: Финляндия и Россия – водосбор Белого моря» с экспедицией на Белое море и сессией для молодых ученых.
- В 2014 году Научно-образовательный центр ИВПС КарНЦ РАН совместно с Советом молодых ученых ИВПС КарНЦ РАН и Отделением РГО в Республике Карелия организовал

и провел IV Международную молодежную школу-конференцию «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии».

- В 2016 году состоялась V Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (лимнологическая школа-практика).

Пандемия коронавируса COVID-19 внесла существенные изменения в проведение подобного рода мероприятий в 2020 году, возникла необходимость изменения формата участия – наряду с очным стало возможным дистанционное участие посредством сети Интернет. Необходимо отметить, что в этой непростой ситуации молодые ученые и их старшие коллеги проявили активную общественную позицию и подготовили результаты своих исследований в виде статей, опубликованных в сборнике материалов конференции, а также устных и стендовых докладов в очном и дистанционном форматах.

Тема конференции «Водные ресурсы: изучение и управление» не перестает быть актуальной в настоящий момент и останется таковой в будущем. В рамках данной конференции молодые научные сотрудники изучали и обсуждали с участием ведущих специалистов, докторов наук, профессоров и членов РАН широкий круг вопросов, таких как проблемы трансграничных водных объектов; формирование водных ресурсов суши в условиях антропогенных воздействий; охрана, рациональное



природопользование и управление водными ресурсами; проблемы водных ресурсов Евразии; моделирование гидрологических и экосистемных процессов; реакция водных объектов на изменение климата; функционирование водных сообществ в условиях изменения климата; формирование и современное состояние биоресурсов крупных водоемов; биоиндикация и биомониторинг, оценка экотоксикологического состояния водных объектов и другие.

Конференция была организована в сотрудничестве с Научно-образовательным центром и Советом молодых ученых ИВПС КарНЦ РАН, Карельским научным центром РАН, Отделением наук о Земле РАН, Российским фондом фундаментальных исследований, Отделением Русского географического общества в Республике Карелия, Международным центром по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Институтом проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (<http://water.krc.karelia.ru/event.php?id=337&plang=r>).

С особым уважением мы приветствовали наших зарубежных коллег, которые в связи со сложившейся ситуацией приняли участие в конференции дистанционно. Это Университет г. Хельсинки (Финляндия), Белорусский государственный университет, Даляньский технологический университет и Университет Чанъань (Китай), Таджикский национальный университет.

Необходимо отметить участие российских высших учебных заведений, таких как Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Российский государственный гидрометеорологический университет, Вологодский государственный университет, Мурманский арктический государственный университет, Севастопольский государственный университет, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Петрозаводский государственный университет, а также среднего общеобразовательного учебного заведения – Гимназии № 2 г. Мурманска. Участие в конференции студентов и аспирантов вселяет надежду на развитие исследований водных ресурсов и принятие грамотных, научно обоснованных решений по их использованию и охране в нашей стране и мире в будущем.

В мероприятии, с учетом опубликованных в материалах конференции работ, в очно-дистанционном режиме приняли участие 65 исследователей и специалистов из 41 научного учреждения, высшего учебного заведения и других организаций. Дистанционная форма была организована на платформе ZOOM одновременно по двум независимым адресам так, чтобы секции могли проходить параллельно. Стеновые доклады были размещены на сайте



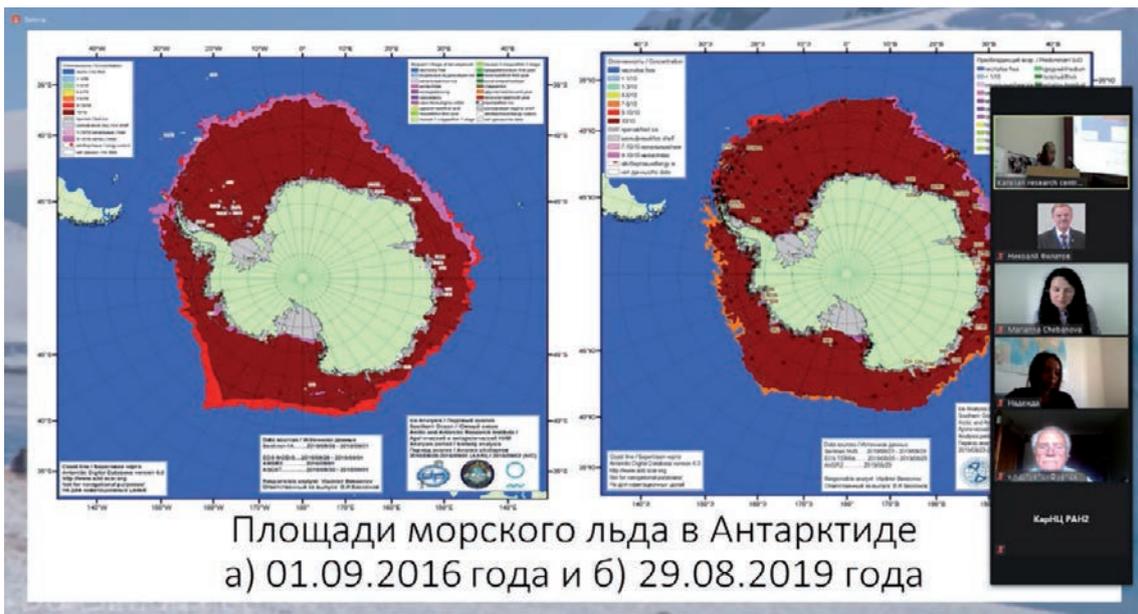
Вручение сертификатов участникам конференции. Сопредседатели по работе с молодежью к.х.н. Н. Е. Галахина и к.г.н. А. В. Толстикова (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН)

ИВПС КарНЦ РАН в разделе конференции в специальном подразделе «Дистанционная постерная сессия» (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=3655>) для более детального знакомства с материалом, с возможностью

размещения комментариев, вопросов автору и его ответов.

С приветствием к участникам обратился председатель оргкомитета чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов и открыл конференцию докладом «О некоторых современных проблемах рационального использования водных ресурсов».

Работа конференции осуществлялась по пяти секциям: «География и гидрология», «Гидрофизика», «Гидробиология», «Гидрохимия», «Донные отложения континентальных водоемов». Рассматривалась современная проблематика изучения водных ресурсов Евразийского региона и трансграничных водных объектов России – обсуждались вопросы экологических проблем и рационального использования трансграничных водных объектов Евразии, изменения состояния водных объектов под воздействием климатических процессов, формирование водных ресурсов суши в условиях антропогенных воздействий, реакции водных объектов и их сообществ на изменение климата, вопросы рационального природопользования, охраны и управления водными ресурсами. Особое внимание было уделено исследованиям, посвященным моделированию гидрологических и экосистемных процессов, формированию и современному состоянию биоресурсов крупных водоемов, применению биоиндикации и биомониторинга, оценке экотоксикологического состояния водных объектов. Рассматривались результаты исследований озер Арктической зоны на примере особенностей термического и ледового режимов на фоне изменчивости регионального климата, сезонной динамики гидрохимических



Площади морского льда в Антарктиде  
а) 01.09.2016 года и б) 29.08.2019 года

Доклад в режиме онлайн



Экскурсия в Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»)



Полевой выход на р. Лососинка. Гидрологические расчеты и оформление отчета. Знакомство с гидрологическими работами проводит гл. гидролог А. Ф. Балаганский



Гидрохимические, гидробиологические и гидрофизические исследования на НИС «Эколог»

показателей, исследования лимнологических показателей, включая уровень воды, что является крайне актуальным для развития этой территории России.

В ходе работы конференции представлено 11 пленарных лекций известных специалистов, 35 устных и 12 стендовых докладов молодых ученых, аспирантов и студентов вузов. К сожалению, это меньше, чем планировалось, с учетом регистрации участников в количестве 107 человек. Однако невозможность очного присутствия и трудности дистанционного участия в момент пандемии не стали препятствием для проведения мероприятия со стороны организаторов ИВПС КарНЦ при поддержке Карельского научного центра РАН и РФФИ, а явились мотивом для получения нового опыта работы.

Формат очно-дистанционного проведения конференции предоставил возможность участия в первую очередь зарубежных коллег в условиях закрытых границ, а также российских участников, которые не смогли приехать по разным причинам. При проведении заседаний использованы все возможности очно-дистанционного общения: представление докладов, вопросы и дискуссии, ведение секций, размещение стендовых докладов онлайн, что способствовало созданию атмосферы технологичности и не нарушило санитарно-эпидемиологических норм в связи с угрозой коронавирусной инфекции.

Для участников школы-практики были организованы как теоретические, так и практические занятия в виде экспресс-экспедиций с возможностью работы в лабораториях ИВПС КарНЦ РАН и на близлежащих водных объектах. Кроме того, в рамках школы-практики состоялась научная экскурсия с использованием научно-исследовательского судна «Эколог» в Петрозаводской губе Онежского озера, где можно было познакомиться с особенностями гидрохимических, гидрофизических, гидробиологических работ в реальных полевых условиях, поскольку в это время проходила экспедиция ИВПС КарНЦ РАН.

В программе конференции были предусмотрены научные экскурсии, организованные с учетом требований обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения на территории Республики Карелия в связи с распространением коронавирусной инфекции (COVID-19). Участники конференции посетили Музей геологии докембрия в Карельском научном центре РАН и Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиал Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). Репортажи об экскурсиях представлены в виде фото- и видеоматериалов на сайте конференции.

Пленарные лекции, секционные презентации, стендовые доклады, мастер-классы шко-

лы-практики и экскурсии, представленные на конференции, размещены как учебный материал Научно-образовательного центра ИВПС КарНЦ РАН для студентов и школьников, учителей средних школ и преподавателей высших учебных заведений на сайте института в свободном доступе.

Материалы конференции были опубликованы до ее начала в виде сборника статей, зарегистрированного в РИНЦ,

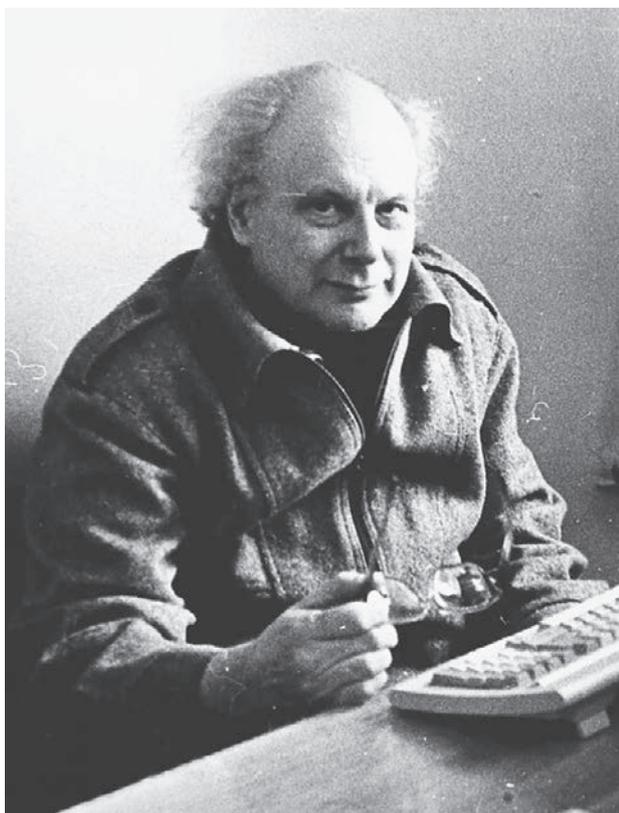
и представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН ([http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/wrrm2020/materialy\\_6\\_konfer\\_wrrm2020.pdf](http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/wrrm2020/materialy_6_konfer_wrrm2020.pdf)).

VI Международная конференция молодых ученых (школа-практика) «Водные ресурсы: изучение и управление» проведена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-22041).

*Т. И. Регеранд, Н. Е. Галахина,  
А. В. Толстиков*

## ЮБИЛЕИ И ДАТЫ

### ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ МЕНШУТКИН (к 90-летию со дня рождения)



Владимир Васильевич Меншуткин родился 20 июня 1930 года в Иркутске, но его родители – коренные петербуржцы. В 1955 году он окончил Ленинградский кораблестроительный институт и получил специальность инженера-механика. Несколько лет работал в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в качестве инженера-исследователя. Но вскоре ушел из этого института и поступил в аспирантуру Лимнологическо-

го института Сибирского отделения Академии наук СССР по специальности «гидрофизика». Неожданному переходу в другую область – лимнологию – есть объяснение. На Байкале работала его мама – известный ученый-лимнолог, и там же, на Байкале, в 12 лет он познакомился с директором Байкальской лаборатории, замечательным ученым, большим энтузиастом своего дела Глебом Юрьевичем Верещагиным. Владимир Васильевич окончил аспирантуру по специальности «гидрофизика», защитил в 1965 году кандидатскую диссертацию, а в 1974 году – докторскую в области биологии. Этому способствовали встреча и совместная работа с замечательными людьми – учеными Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохиным, которые 40 лет проработали на Камчатке. Вместе с ними он создал модель камчатского озера Дальнего, которая помогла решить важную проблему регулирования лова и сохранения популяции красной рыбы и даже способствовала решению международного соглашения с Японией по квотам вылова красной рыбы. За эту работу в 1971 году Владимир Васильевич вместе с Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохиным был удостоен Государственной премии СССР.

Работы В. В. Меншуткина по созданию моделей экосистем озер и популяционных моделей ихтиоценозов были одними из первых в мире. Эти работы хорошо известны в нашей стране и за рубежом.

После случайной встречи на Камчатке с академиком Евгением Михайловичем Крепсом он был приглашен в Ленинград, в Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова. В этом институте Владимир Василь-

евич занимался различными проблемами, в том числе моделированием кровообращения в мозге человека при перегрузках во время взлета космического корабля, разрабатывал модели в области физиологии (кровообращение и водно-солевой обмен). В промежутке между этими важными исследованиями, в том числе связанными с космической тематикой, он вместе со своим другом и коллегой профессором Л. А. Жаковым с энтузиазмом изучал биоту озер Херя-Ярви и Пуннус-Ярви, расположенных под Ленинградом. На этих озерах они ставили очень интересные эксперименты, которые помогли понять, как функционирует экосистема озера, как формируется популяция, а не просто моделировать экосистему с использованием столь популярных в среде модельеров, но не очень продуктивных подходов (например, «хищник-жертва»), которые не всегда работали в реальном водном объекте.

Зная о его опыте математического моделирования различных процессов, Владимира Васильевича пригласили сотрудничать с ИНОЗ СССР в создании модели экосистемы Ладожского озера, которое в 1970–1980 годы стало сильно загрязняться промышленными сбросами и, как результат, подверглось антропогенному эвтрофированию. В 1980–1986 годах В. В. Меншуткин был одним из научных руководителей Ладожской экспедиции Института озероведения АН СССР, а в 1991–1995 годах – научным руководителем проекта СПбНЦ РАН «Невская губа», в реализацию которого он внес большой личный вклад. Он являлся инициатором создания и разработчиком модели регулирования водопользования экономическими методами. Модель экосистемы озера создавал вместе с сотрудниками Института озероведения АН СССР, которые обеспечивали модель данными и знаниями. Для Владимира Васильевича всегда было правилом: при создании модели, чтобы глубже понять исследуемые процессы, лично участвовать в экспедициях, будь то на озере Дальнем или Ладоге, а потом на Невской губе Финского залива. Это действительно важно, так как часто собранные другими исследователями и очень интересные материалы не всегда могут быть использованы в математических моделях.

В 1990-х годах в связи с созданием комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений В. В. Меншуткина пригласили руководить творческим коллективом по разработке системы управления водной системой Невской губы Финского залива Балтийского моря. И там, как и при работе на других водных объектах, ему приходилось не только вести

длинные переговоры с участниками проекта, чтобы они помогли обеспечить модель необходимыми данными, но и самому черпать пробы планктона и бентоса, фиксировать кислород, подсчитывать под микроскопом число рачков различных видов.

Неожиданно Владимира Васильевича пригласили в океанические рейсы Института океанологии АН СССР, где были наслышаны о его способностях модельера. Во время океанских экспедиций он познакомился с академиком АН Польши Ромуальдом Клековским, который в трудные для отечественной науки и для ученых России 90-е пригласил В. В. Меншуткина в Международный экологический центр в Варшаву. Там они вместе создали модели экосистем водохранилищ, наземных экосистем и написали несколько книг по математическому моделированию. Работая в этом центре, Владимир Васильевич опять не мог не участвовать в экспедициях по Судетам и Карпатам – таков характер.

С 1987 года В. В. Меншуткин имеет звание профессора. Существенный вклад он внес в создание различных моделей в области физиологии. Широкую известность получили его работы по моделированию эволюции. Им создана оригинальная модель эволюции животных (например, гаммарид озера Байкал).

В начале 2000-х Владимир Васильевич вернулся в Санкт-Петербург, где стал работать главным научным сотрудником лаборатории моделирования Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. Вместе с директором СПб ЭМИ РАН профессором Л. А. Руховцом и коллегами из ИНОЗ РАН он продолжил развитие моделей Ладожского озера и Невской губы. В эти же годы Владимир Васильевич стал тесно сотрудничать с Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН. Нам, сотрудникам института, повезло работать с таким крупным ученым, замечательным человеком, энтузиастом. В первый же приезд в ИВПС КарНЦ РАН он рассказал о своем видении современных лимнологических проблем и путях их решения. Он предлагал подходы к задаче описания озера как целостной системы с позиций когнитивной науки. С появлением теории искусственного интеллекта, понятия нечетких множеств и развитием компьютерных технологий это направление оформилось в виде самостоятельного инструмента исследований. И как определил Владимир Васильевич, озера Карелии представляются удобным объектом для опробования новых для лимнологии подходов благодаря хорошей изученности многочисленных озер региона. Он поставил задачу создать

компьютерную базу данных и экспертную систему «Озера Карелии», которая позволит решать многочисленные лимнологические задачи. Вместе с сотрудниками Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН осуществлялась давняя мечта Г. Г. Винберга и В. В. Меншуткина по созданию экспертной системы для оценки состояния озер и их биологических ресурсов на примере хорошо изученного озерного региона. Заметим, что и для России в целом вопрос оценки состояния озер, их биоресурсов – задача весьма актуальная: из более чем 2,5 млн озер изучено менее 1 %. Совместно с К. В. Показеевым и Н. Н. Филатовым им была подготовлена книга «Гидрофизика и экология озер», изданная в МГУ в 2004 г. Переход В. В. Меншуткина на работу в СПб ЭМИ РАН еще больше способствовал научному сотрудничеству с ИВПС КарНЦ РАН, поскольку между СПб ЭМИ РАН и ИВПС в начале 1990-х был заключен договор о сотрудничестве. Всего в соавторстве с сотрудниками ИВПС В. В. Меншуткин опубликовал две монографии и 22 статьи, из них четыре – в «Трудах Карельского научного центра РАН» (серии «Лимнология» и «Лимнология и океанология»). В монографии «Искусство моделирования», изданной в РИО КарНЦ РАН в 2010 г., помимо теоретических основ моделирования описаны 50 конкретных моделей, созданных автором.

За работы в области математического и имитационного моделирования (в частности, экологических систем Невской губы и Ладожского озера) в 2006 году Правительством Санкт-Петербурга В. В. Меншуткин был удостоен премии им. А. П. Карпинского в области наук о Земле. Владимир Васильевич продолжал заниматься одновременно несколькими задачами с использованием разнообразного математического аппарата (от систем дифференциальных уравнений до конечных автоматов, нечеткой логики, когнитивного моделирования) и доведением исследований до работающих программных продуктов.

В 2018–2020 годах В. В. Меншуткин совместно с сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН и Института экономики КарНЦ РАН создает модели сложной социо-эколого-экономической системы для Белого моря и его водосбора с исполь-

зованием когнитивного подхода. Поскольку состояние водоема зависит от процессов, происходящих вокруг него в экономике, окружающей среде и социальной сфере, в экологическую систему водоема были включены наземные системы, расположенные на территории его водосбора. Из-за разнородности элементов моделируемой системы при построении эколого-экономической модели взаимодействия экономики региона с экологической системой водоема применено когнитивное моделирование.

В. В. Меншуткин является автором 310 печатных работ, в том числе 28 книг. Среди них пять автобиографических – с воспоминаниями о знаменитых лимнологах, о его известных родственниках, которыми он гордится, с размышлениями о лимнологии и об эволюции сложных систем, с рассказами о его удивительной жизни, которая складывалась так, что приключения будто бы сами находили его и бросали в новые неизведанные области. Эти книги адресованы всем, кто интересуется наукой, и особенно они могут быть полезны молодым людям, только определяющимся в жизни. Им будет интересно узнать, как непросто порой выбирать жизненный путь, какие неожиданные повороты случаются в судьбе, как важно не бояться принимать неформальные решения, которые, как потом окажется, будут правильными и позволят человеку заниматься не просто важным делом, а делом, которое приносит удовлетворение.

Нам посчастливилось много работать с Владимиром Васильевичем, внедрять и осваивать его модели, и можем вас уверить: и работать, и беседовать с ним, слушать увлекательные рассказы и размышления, читать статьи и книги этого удивительного человека потрясающей эрудиции, интеллигента с феноменальной памятью, крупного ученого, достойного потомка известных фамилий не просто доставляет великое удовольствие, но и вдохновляет, приносит огромную пользу и множество идей.

Мы желаем Владимиру Васильевичу Меншуткину доброго здоровья, оптимизма, реализации задуманных планов и замечательных прогулок по любимым местам Петербурга.

*Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик*

## 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](mailto: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 TIFF (\*.TIF) или JPG. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указанием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, элек-

\* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

тронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

**ПОДПИСИ К РИСУНКАМ** приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

**ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ.** В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites 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](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. Шерудило<sup>1</sup>, М. И. Сысоева<sup>1</sup>, Г. Н. Алексейчук<sup>2</sup>, Е. Ф. Марковская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии Карельского научного центра РАН

<sup>2</sup>Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

**E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS**

Аннотация на английском языке

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ**

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ**

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

(а) – электронная микрофотография кварца; (б) – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; (в) – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

(а) – electron microphotograph of the quartz sample; (б) – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; (в) – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ**

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

References:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. *Zhurn. obshh. biol.* [Biol. Bull. Reviews]. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi: 10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf.* (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu 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. 9, 2020**

**“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY”**

**TABLE OF CONTENTS**

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

- I. S. Zverev, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, N. I. Palshin, S. R. Bogdanov, G. G. Gavrilenko, S. Yu. Volkov, T. V. Efremova, S. D. Golosov, A. Yu. Terzhevnik. RESPONSE OF A SHALLOW LAKE TO WIND LOAD DURING THE OPEN WATER PERIOD (3D NUMERICAL EXPERIMENTS). . . . . 5

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

- A. V. Guzeva, I. V. Fedorova. CHEMICAL FRACTIONS OF HEAVY METALS IN SEDIMENTS OF LAKES ON SAMOYLOV ISLAND, THE LENA DELTA . . . . . 18

- D. V. Ivanov, V. S. Valiev, R. R. Shagidullin. STATISTICAL APPROACH TO ESTIMATING REGIONAL BACKGROUND CONCENTRATIONS OF PETROLEUM HYDROCARBONS IN SEDIMENTS . . . . . 30

- A. V. Leonov, M. V. Zobkova. CORRESPONDENCE BETWEEN THE PARAMETER VALUES OF LONG-TERM BOD KINETICS AND CONCENTRATIONS OF ORGANIC MATTER COMPONENTS IN WATERS FROM DIFFERENT REGIONS OF LAKE ONEGO . . . . . 40

- G. T. Frumin, M. A. Muradly. DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF THE NARVA STORAGE RESERVOIR (2011–2019) . . . . . 65

- G. S. Borodulina, S. A. Svetov, I. V. Tokarev, M. A. Levichev. THE ROLE OF HIGH-CARBON (SHUNGITE-BEARING) ROCKS IN FORMING THE COMPOSITION OF SUBSURFACE WATER IN THE ONEGA STRUCTURE . . . . . 72

HYDROBIOLOGY

- G. G. Mitrukova, L. L. Kapustina, E. A. Kurashov. ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF WATER QUALITY OF THE LITTORAL ZONE OF LAKE LADOGA BASED ON THE RESULTS OF MICROBIOLOGICAL STUDIES . . . . . 88

PALEOLIMNOLOGY

- T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova. PALEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS OF THE NORTHWEST KARELIA REGION EVOLUTION IN THE HOLOCENE BASED ON THE STUDY OF SMALL LAKE SEDIMENTS. . . . . 101

RESEARCH METHODS

- Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein. ESTIMATION OF THE MINERAL PHOSPHORUS BALANCE STRUCTURE IN THE MOZHAISK STORAGE RESERVOIR BASED ON THE RESULTS OF MODEL CALCULATIONS. . . . . 123

CHRONICLE

T. I. Regerand, N. E. Galakhina, A. V. Tolstikov. 6<sup>th</sup> International Young Scientists Conference (School and Workshop) "WATER RESOURCES: RESEARCH AND MANAGEMENT" (Petrozavodsk, September 1–5, 2020). . . . . 133

DATES AND ANNIVERSARIES

N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevnik. Vladimir V. Menshutkin (on the 90<sup>th</sup> anniversary). . . . . 139

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . . 142

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 9, 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 24.09.2020. Дата выхода 30.09.2020. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 16,5. Усл. печ. л. 17,4.  
Тираж 150 экз. Заказ 620. 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